

**Experimentelle Untersuchungen zur
mehraxialen Festigkeit von Stahlfaserbeton
- Tastversuche im Druck-Zug-Bereich -**

Bericht
erstattet
von

Dr.-Ing. U. Diederichs

Mai 1991

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Untersuchung im Auftrag der
HOCHTIEF AG, Abtlg. Ingenieurbau und Konstruktionssoftware,
Frankfurt am Main.

Auftrag vom 11. Mai 1990

Inhaltsübersicht

1. Allgemeines
2. Aufgabenstellung
3. Herstellung und Vorbereitung der Probekörper
4. Durchführung der Versuche und Versuchsergebnisse
 - 4.1 Versuchsdurchführung
 - 4.2 Versuchsergebnisse
5. Zusammenfassung
6. Schrifttum

1. Allgemeines

Die HOCHTIEF AG, Abtlg. Ingenieurbau und Konstruktionssoftware, beauftragte das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz mit Schreiben IKS-Rie/st vom 11. Mai 1990 mit der Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der zwei axialen Festigkeit und des Verformungsverhaltens von Stahlfaserbeton im Druck-Zug-Bereich.

In einer ersten Versuchsphase (Tastversuche A) sollten zunächst neun Versuche (jeweils drei Versuche mit je drei unterschiedlichen Druck-Zug-Last-Kombinationen) durchgeführt werden.

Den dazu erforderlichen Probekörper stellte die HOCHTIEF AG in Frankfurt her. Im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz waren die Proben für die Versuche entsprechend vorzubereiten und zu prüfen.

Die erste Versuchsphase wurde zwischenzeitlich abgeschlossen. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind der HOCHTIEF im Vorabbericht vom 18. Oktober 1990 in knapper Form mitgeteilt worden.

In dem vorliegenden Bericht ist die Durchführung der Versuche dokumentiert; außerdem wird eine Zusammenstellung der erzielten Versuchsergebnisse gegeben.

2. Aufgabenstellung

Insgesamt sollten neun Versuche durchgeführt werden, wobei jeweils drei Proben pro vorgegebener Druck-Zug-Last-Kombinationen geprüft werden sollten.

Als Proben waren Scheiben mit den Abmessungen 400 x 200 x 50 mm vorgesehen. Die Einleitung der Zugkräfte sollte über Gewindestangen erfolgen, die im Zuge der Herstellung einzubetonieren waren. Die Druckkräfte sollten zur möglichst zwangsfreien Einleitung der Lasten über Belastungsbürsten eingeleitet werden. Es war geplant, die Versuchskörper aus einem größeren Stahlfaserblock herauszusägen, um die Einflüsse aus Faserausrichtungen im Randbereich der Schalungen möglichst auszuschließen. Bei den Versuchen sollten jeweils die Kräfte und die Dehnungen in allen drei Achsen gemessen werden.

Zusätzlich sollten auf Wunsch der Firma HOCHTIEF AG bei den Versuchen die Entstehung von Mikrorissen mittels Schallemissionsanalyse verfolgt werden.

3. Herstellung und Vorbereitung der Probekörper

Die Firma HOCHTIEF AG stellte einen Stahlfaserbetonblock mit den Abmessungen 315 x 400 x 580 mm her. An den Stirnseiten waren jeweils Gewindestangen mit unterschiedlichen Einbettungslängen einbetoniert (vgl. Bild 1).

Nach Eintreffen des Stahlfaserbetonblocks wurde dieser im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz mittels Diamantkreissäge (Durchmesser des Sägeblatts 1100 mm, Schnittbreite 5,5 mm) unter Wasserkühlung in Scheiben von ca. 315 x 400 x 49 mm zersägt (vgl. Bilder 1 und 2). Anschließend wurden noch die oberen und unteren Ränder der Platten mit einer kleineren Diamantkreissäge abgeschnitten, so daß sich die eingangs erwähnte Probekörperabmessung von ca. 400 x 200 x 49 mm ergab (vgl. Bild 3).

Die Proben wurden von der Anlieferung bis unmittelbar vor Durchführung der Sägearbeiten in den Schalungen belassen, um die Hydratation des Probekörpers nicht zu stoppen. Nach Durchführung der Sägearbeiten wurden die Proben ohne längere, dazwischenliegende Wartezeiten in die Prüfmaschine eingebaut und geprüft.

4. Durchführung der Versuche und Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in der biaxialen Hochtemperatur-Prüfmaschine des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Belastungs-, Regelungs- und Meßeinrichtungen findet sich u. a. in [1], so daß an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung der Anlage verzichtet werden kann. Zur leichteren Orientierung sind jedoch in den Bildern 4 bis 10 der Aufbau des Prüfstandes, Details der Belastungsbürsten und die Anordnung des Verformungsmeßsystems dargestellt.

Zur Durchführung der Zugversuche wurden die Probekörper zunächst in Zugrichtung eingebaut und zur Ausrichtung der Proben mit einer Vorlast von rd. 1 kN belastet. Anschließend erfolgte die Belastung in der y-Ebene mit der entsprechend dem gewünschten Spannungsverhältnis angestrebten Druckspannung. Die Lastanstiegsgeschwindigkeit betrug hier rd. 5 kN/sec. Nach Erreichen der gewünschten Druckkraft wurde der Druck konstant gehalten und die Probe wurde in Zugrichtung mit konstanter Zylindervorschubgeschwindigkeit bis zum Eintreten des Bruchs belastet. Die Vorschubgeschwindigkeit der Zylinder wurde so gewählt, daß die erwartete Bruchspannung nach einer Belastungsdauer von etwa 15 min erreicht wurde.

Um für die weitere Analyse der Versuchsdaten die erforderlichen Bezugswerte der Kurzzeitdruckfestigkeit zu erhalten, wurden zusätzlich zum ursprünglich vorgesehenen Versuchsprogramm zwei einaxiale Druckversuche an Proben durchgeführt, bei denen bei der Durchführung der Zugversuche außerhalb des Einleitungsbereichs der Druckkräfte Versagen eingetreten war. Dazu wurden die entsprechenden Proben nach der Durchführung der Zugversuche auf die erforderliche Länge von 200 mm mittels wassergekühlter diamantbesetzter Kreissäge gekürzt. - Bei den Druckversuchen wurde die Vorschubgeschwindigkeit der Belastungszylinde wieder so gewählt, daß der Bruch nach einer Belastungsdauer von etwa 15 min eintrat.

Gemessen wurden bei den Zugversuchen über die gesamte Versuchsdauer die Kräfte und die Verformungen der Probekörper in den drei Achsen.

Die Rißbildungen wurden mittels Schallemissionsanalyseeinheit während der gesamten Belastung verfolgt. Dazu wurde auf dem Probekörper ein entsprechender Piezoaufnehmer unter Verwendung eines Koppelmittels aufgesetzt. - Aufgezeichnet wurde als Meßgröße die sog. Impulssumme. Hinsichtlich der Meßverfahren und der Auswertung der Meßergebnisse sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (s. z. B. [2] und [3]).

Die Bezeichnung der im einzelnen untersuchten Probekörper ist zusammen mit den Versuchsparametern und einigen Versuchsergebnissen in der Tabelle 1 in Anlage 10 zusammengestellt.

4.2 Versuchsergebnisse

Begonnen wurde bei den Untersuchungen mit den reinen Zugversuchen. Hierzu wurden die Proben 190, 192 und 193 verwendet. Die dabei gemessenen Verformungen sind in den Diagrammen (Bilder 11, 14 und 16) wiedergegeben. In diesen und in den folgenden Diagrammen sind die Mittelwerte der Verformungen (gemessen an jeweils zwei auf den Probekörpern diagonal gegenüberliegenden Meßstrecken) in den drei Achsen wie folgt gekennzeichnet (vgl. auch Bild 6):

- MEps 1 = ϵ_1 = Verformungen in der Zugachse
- ... MEps 2 = ϵ_2 = Verformungen in der Druckachse
- MEps 3 = ϵ_3 = Verformungen in der freien, unbelasteten Achse,

wobei noch zu bemerken ist, daß in der Regel die Meßlängen in ϵ_1 - und ϵ_2 -Richtung 100 mm und in den freien Achsen 49 mm betragen haben (vgl. auch Bilder 7 bzw. 9. - Negative Verformungswerte bedeuten Stauchungen, positive Werte Dehnungen der Proben.

Bild 11 kann man entnehmen, daß bei diesem Versuch trotz der aufgebrauchten Zugspannung in der Zugachse i. M. Probekörperstauchungen gemessen wurden. Vorzeichenrichtig traten in der ϵ_2 zwar Stauchungen auf, die Größe dieser Stauchungen ist jedoch eindeutig zu hoch. In der freien Achse (ϵ_3) sind vielfach sprunghafte Änderungen bei der Messung aufgetreten, die in der Tendenz auf Probekörperverlängerungen hindeuten. - Der Bruch des Probekörpers trat bei einer Zugbeanspruchung von $3,74 \text{ N/mm}^2$ ein. Wie den Bildern 12 und 13 zu entnehmen ist, liegt die Bruchfläche nahe des rechten Randes des Probekörpers in der Ebene der aufgeschraubten Muttern auf den Gewindestangen (zur Einleitung der Zugkräfte).

Die Gemessenen Verformungen deuteten darauf hin, daß der Probekörper unsymmetrisch eingebaut und belastet worden war. Daraufhin wurde das Zugkrafteinleitungssystem nochmals überprüft. Festgestellt wurde, daß die Wirkungslinien der rechts und links vom Probekörper angreifenden Zugkräfte aufgrund einer fehlerhaft angebrachten Bohrung um 0,5 mm gegeneinander versetzt waren. Nach Beseitigung dieser Fehlerquelle erfolgte die Prüfung von Probe 192. Die am Probekörper 192 gemessenen Verformungen sind in Bild 14 dargestellt. Hier werden die in Zugrichtung gemessenen Verformungen nach der Anfahrperiode (Zugspannung ca. $0,6 \text{ N/mm}^2$) vorzeichenrichtig und in der richtigen Größenordnung wiedergegeben. Die Verformungen in den freien Achsen werden zwar ebenfalls nach Verlassen der Anfahrphase vorzeichenrichtig wiedergegeben, jedoch weichen die Verformungen in beiden Achsen zu stark voneinander ab. Ursache hierfür waren, wie sich nach weiterer Überprüfung herausstellte, Biegebeanspruchungen, die offenbar durch zu starkes Vorspannen der Gewindestangen beim Aufschrauben des Bügels zur Zugkraftübertragung auf die Kraftmeßdose (s. Bild 7, rechte Seite) entstanden sind. Der Probekörper versagte schließlich bei einer mittleren Zugspannung von $3,60 \text{ N/mm}^2$ in der Ebene der Muttern auf den Zugstangen (vgl. Bild 15).

Bei der Prüfung der Probe 193 wurden die Schrauben nur noch sehr gering vorgespannt. Bei der Durchführung der Zugprüfung traten, wie Bild 16 zu entnehmen ist, offenbar immer noch zu hohe Biegespannungen auf. Der Bruch dieser Probe trat ebenso wie bei den vorher geprüften Proben 190 und 192 etwa in der Ebene der Muttern auf den Zugstangen auf. Als Bruchspannung wurden $3,66 \text{ N/mm}^2$ gemessen.

Zur Festlegung des Spannungsverhältnisses Druckspannung/Zugspannung wurde aus dem nach Durchführung der Zugprüfung an Probe 193 unversehrt gebliebenen Reststück (linke Hälfte des in Bild 17 abgebildeten Probekörpers) eine Scheibe $200 \times 200 \times 49$ mm mit einer Diamantkreissäge naß herausgeschnitten und im einachsigen Druckversuch geprüft. Die Versagensspannung dieser Probe betrug $54,4 \text{ N/mm}^2$ entsprechend 530 kN.

Zur Durchführung des kombinierten Druck-Zug-Versuches an Probe 194 wurde der Probekörper mit 265 kN (entsprechende 50 % der im einachsialen Druckversuch ermittelten Versagenskraft) in der Druckachse vorbelastet. Anschließend erfolgte die Belastung in der Zugrichtung. - Zu erwähnen ist noch, daß zur weiteren Verringerung von Biegemomenten der Probekörper noch geringer vorgespannt wurde als bei den vorerwähnten Versuchen und daß man durch anordnen einer weichen Zwischenlage zwischen Probekörperstirnfläche und Halterung zur Übertragung der Zugkräfte auf die Kraftmeßdose versucht hat, eine möglichst biegeeweiche Vorspannung zu erreichen.

Die gemessenen Verformungen sind in den Bildern 18 und 19 dargestellt. Man erkennt, daß die Dehnungen in der Zugachse zwar im richtigen Sinn gemessen worden sind, jedoch läßt die Anfangssteigung dieser Kurve auf einen zu gering gemessenen Elastizitätsmodul schließen. Auch zeigen sich in der freien Achse und in der druckbeaufschlagten Achse leichte Ausdehnungen. Sie sind ein Indiz dafür, daß die gewünschten idealen Spannungsverhältnisse bei der Prüfung des Probekörpers nicht erzielt worden sind. Bei der Prüfung dieses Probekörpers trat unter Zugbelastung bei etwa $1,0 \text{ N/mm}^2$ ein erster Riß auf (vgl. auch Bild 19). Bei weiterer Steigerung der Dehnung fiel die entsprechende Zugkraft zunächst geringfügig ab, um dann bei Erhöhung der Dehnung wiederum linear anzusteigen. Der Bruch dieser Probe trat bei $1,6 \text{ N/mm}^2$ ein und lag, wie den Bildern 20 und 21 zu entnehmen ist, außerhalb des Einleitungsbereichs der Druckkräfte. Auch hier erfolgte der endgültige Abriß in der Ebene der Muttern auf den Zugstangen.

Ähnlich verliefen Verformungen und Rißbildung bei Probekörper 195, der mit einer Druckspannung von etwa 50 % der am Probekörper 193 a gemessenen Bruchspannung vor und während der Einleitung der Zugkräfte belastet worden war. Auch hier zeigte sich bei einer relativ geringen Spannung von $0,6 \text{ N/mm}^2$ ein erster Riß (vgl. Bild 22). Bei Steigerung der Belastung stiegen dann sowohl Kräfte als auch Verformungen weiter an. Schließlich versagte der Probekörper nach einer gemessenen Gesamtdehnung von 2 ‰ bei rd. 2 N/mm^2 (s. Bild 23). Hinsichtlich der Rißbildung ist zu bemerken, daß zunächst ein erster Anriß ungefähr in der Probekörpermitte von unten nach oben erfolgt ist. Bei Erhöhung der Zugkräfte setzt

dann wiederum seitlich Rißbildung in der Ebene der aufgeschraubten Muttern auf den Zugstangen ein. Dieser Riß führte schließlich zum Versagen der Probe (vgl. auch Bilder 23 bis 25).

Das Reststück von Probekörper 195 wurde auf eine Scheibengröße von $200 \times 200 \text{ mm}^3$ geschnitten und im einachsialen Versuch hinsichtlich Druckfestigkeit geprüft. Als Bruchkraft wurden 490 kg/N entsprechend $49,8 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Mit etwa einem Viertel der in den Druckversuchen gemessenen Bruchspannungen wurden die Proben 196 und 198 in der Druckrichtung belastet (125 kN) und unter Konstanthaltung dieser Belastung bis zum Versagen in Zugrichtung beansprucht. Die entsprechenden Verformungsdiagramme finden sich in den Bildern 26 und 29. Probe 196 versagte bei etwa $2,11 \text{ N/mm}^2$. Der Abriß erfolgte bei Probe 196 etwa in der Ebene der äußeren Borsten der Belastungsbürste, also etwas von der Ebene der Lage der Schrauben auf den Zugstangen Richtung Probekörperzentrum verschoben. Demgegenüber versagte Probe 198 bei $1,57 \text{ N/mm}^2$ direkt in der Probenmitte, wie den Bildern 30 und 31 zu entnehmen ist.

Probekörper 199 und 200 wurden bis auf rd. 74 % der einachsialen Bruchlast im Druckbereich vorbelastet und anschließend mit entsprechenden Zugkräften belastet. Die dabei gemessenen Verformungen sowie die Bilder der Probekörper nach Versuchsende enthalten die Bilder 32 bis 37. Probekörper 199 versagte bei $1,3 \text{ N/mm}^2$ und Probekörper 200 bei $1,13 \text{ N/mm}^2$. Der Abriß trat bei Probekörper 199, wie den Bildern 33 und 34 zu entnehmen ist, wiederum direkt im Bereich der äußeren Borsten der Belastungsbürste ein. Auch bei Probekörper 200 trat der Bruch in diesem Bereich auf.

Der Vollständigkeit wegen sind in den Bildern 38 und 39 die Fotografien des im einachsialen Druckversuch geprüften Probekörpers 193 wiedergegeben.

In Bild 41 sind die in Abhängigkeit von den Spannungsverhältnissen gemessenen Bruchspannungen in der σ_1 - σ_2 -Ebene nochmals dargestellt. Man erkennt, daß die Bruchgrenzkurve trotz der teilweise bei den Versuchen aufgetretenen unsymmetrischen Belastungen mit dem zu erwartenden Verlauf übereinstimmt, d. h. quasi linear von reiner Zugbeanspruchung bis zur reinen Druckbeanspruchung abnimmt.

Mit Hilfe der Messung der Schallemissionen sollte das Einsetzen der Brüche bei Belastung der Probekörper genauer untersucht werden. Gemessen wurde die Schallemission bei den Proben 194, 195, 196, 198, 199 und 200. - Bei Probekörper 195 ist der Aufnahmekopf während der Belastung der Proben abgefallen, so daß die Messungen nicht ausgewertet werden konnten. Die Ergebnisse der Messungen an den

übrigen Probekörpern sind in den Bilderern 41 bis 45 wiedergegeben. Dargestellt sind in den Diagrammen jeweils die Zugspannung und die Impulssumme der Schallemission über der Belastungsdauer. Geordnet sind die Diagramme nach Höhe der Druckbeanspruchung während der Durchführung der Zugversuche.

Im Bild 41 ist der Verlauf der Schallemission und der Zugspannungen für Probe 196 dargestellt, die während der Durchführung der Zugversuches mit rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit beansprucht war. Man erkennt, daß bis zu einer Belastungsdauer von etwa 8 min, was einer Zugbeanspruchung von $1,45 \text{ N/mm}^2$ entspricht, kaum Schallimpulse emittiert werden. Für den Zeitraum 8 - 10,5 min ist ein ganz leichter Anstieg der Impulssummenkurve zu verzeichnen. Knapp oberhalb der Belastungsdauer von 10,5 min bleibt die Zugspannung nahezu konstant, die Impulssumme steigt rasch an und kündigt damit das Einsetzen der Rißbildung an. Anschließend fällt die Zugspannung von dem Maximalwert von $1,94 \text{ N/mm}^2$ schlagartig auf eine Spannung von $1,76 \text{ N/mm}^2$ ab. Hierbei steigt die Schallemission weiter stark an und bleibt auch auf einem relativ hohen Niveau während der dann einsetzenden Zugspannungshalteperiode. Schließlich fällt die Zugspannung auf ein unteres Niveau von $1,64 \text{ N/mm}^2$ ab. Es ist davon auszugehen, daß hier die Rißbildung in der Betonmatrix bereits vollständig abgeschlossen ist und daß die in diesem Bereich auftretenden Schallemissionen durch das Ausziehen von Fasern aus der Betonmatrix verursacht werden.

Bei der Probe 198, die ebenfalls unter einer Druckbeanspruchung von rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit geprüft worden ist, ergibt sich bei Belastungsbeginn zunächst innerhalb der ersten halben Minute ein starker Anstieg der Impulssumme. Offenbar haben sich hier noch leichte Verschiebungen beispielsweise der Probe zwischen den Druckbelastungsbürsten oder zwischen Belastungsbügel und Zugstangen ergeben. Im anschließenden Belastungsbereich steigt die Schallimpulssumme wiederum relativ geringfügig an. Nach etwa 9,75 min steigt die Schallimpulssumme sprunghaft an. Gleichzeitig geht die Zugspannung S-förmig zurück. Sie steigt dann nach einer Belastungszeit von 10,5 min wieder linear an. Der sprunghafte Anstieg der Impulssumme ist klar mit der Ausbildung des Risses in der Probenmitte verknüpft, welcher auch visuell in dieser Versuchsphase beobachtet worden ist. Durch das Aufgehen des Risses ist ebenfalls kurzzeitig die Zugspannung abgesunken (damit konstanter Kolbengeschwindigkeit gezogen worden ist). Aufgrund des ausgebildeten Risses steigt im weiteren Belastungsverlauf die Schallemissionsimpulssumme weiter an, was auf die Ausbreitung des Risses mit gleichzeitigem Ausziehen von Stahlfasern aus der Matrix schließen läßt. Ab der 16. Belastungsminute steigt die Impulssumme wiederum sehr stark an, was auf eine deutliche Vergrößerung des Risses verbunden mit dem Ausziehen von Fasern hindeutet und wo-

durch sich das Versagen der Probe, das schließlich bei etwa $2,45 \text{ N/mm}^2$ beobachtet worden ist, vorankündigt.

Probe 194 ist während der Durchführung des Zugversuches mit rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit belastet worden. Wie Bild 43 zu entnehmen ist, steigt die Impulssumme bis zu einer Belastungsdauer von 8 min progressiv an. Das heißt, daß in diesem Zeitraum praktisch eine lineare Zunahme der Schallemissionsaktivität stattgefunden hat. Offenbar sind hier kontinuierlich feinste Risse im Probekörper entstanden. Nach einer Belastungsdauer von knapp 8 min steigt die Schallemissionsimpulssumme dann schlagartig auf sehr große Werte an. Gleichzeitig wurde ein Abfall der Zugspannung von 1,02 auf 0,92 und das Auftreten eines Risses in der Probenmitte beobachtet. Bei fortschreitender Belastung steigt die Schallimpulssumme weiter stark an. Der endgültige Bruch des Probekörpers zeigt sich in dem progressiven Ansteigen der Impulssumme ab etwa der 14. min.

Die Bilder 44 und 45 zeigen die Schallimpulssummenverläufe der Proben 199 und 200, die mit einer Druckspannung von rd. 75 % der Kurzzeitdruckfestigkeit relativ hoch während des Zugversuches belastet waren. Sowohl bei der Probe 199 als auch bei der Probe 200 steigt die Schallemissionssummenkurve progressiv mit der Belastungsdauer an, woraus sich Hinweise auf eine quasi stetige Bildung von feinen Mikrorissen ergeben. Bei der Probe 199 nimmt die Schallemissionsaktivität dann kontinuierlich progressiv bis zum Einsetzen des Bruches ab, was sich in dem Diagramm hauptsächlich durch das Konstanthalten der Zugspannung bzw. den leichten Abfall der Zugspannung und der leichten Verringerung des Schallimpulssummenanstiegs äußert. Bei Probe 200 tritt demgegenüber etwa in der neunten Belastungsminute ein sprunghafter Anstieg der Schallimpulssumme ein, dessen Ursache wiederum in einer starken Ribbildung zu sehen ist. Nach Überschreiten der Höchstlast geht der Anstieg der Impulssumme wieder leicht zurück, woraus zu folgern ist, daß die entsprechenden Schallsignale nur noch durch das Ausziehen von Fasern erzeugt werden, die naturgemäß nach Überwindung der Haftung leichter aus der Matrix herausgleiten und weniger Schallenergie dabei emittieren.

5. Zusammenfassung

Die Firma HOCHTIEF AG, Frankfurt, hat das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz mit der Durchführung von Versuchen zur Ermittlung des zweiachsialen Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Stahlfaserbeton in Druck-Zug-Bereich beauftragt.

Dazu stellte die Firma HOCHTIEF AG ein Stahlfaserbetonblock mit den Abmessungen 315 x 400 x 580 mm her, an dem an den Stirnseiten jeweils Gewindestangen mit unterschiedlichen Einbettungslängen einbetoniert worden sind.

Aus diesem Block wurden mittels wassergekühlter Diamantkreissäge Scheiben von ca. 200 x 200 x 49 mm³ herausgeschnitten und in der biaxialen Prüfmaschine des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz geprüft.

Bei den Prüfungen wurden zunächst die reinen Zugversuche an drei Probekörpern durchgeführt, um Erfahrungen über das Bruchverhalten des Stahlfaserbetons zu gewinnen und die Interaktion zwischen Probekörper und Prüfmaschine sowie die Versagensarten genauer kennenzulernen.

Anschließend erfolgten die Druck-Zug-Versuche. Hierbei wurden die Proben jeweils mit rd. 25, 50 und 75 % ihrer Kurzzeitdruckfestigkeit belastet. Dann erfolgte die Belastung mit Zugspannungen, resultierend aus dem mit konstantem Vorschub angetriebenen Belastungszylindern, bis zum Versagen der Proben.

Gemessen wurden bei den Versuchen die Verformungen der Proben sowie die dazugehörenden Zug- und Druckspannungen und zum Studium des Rißverhaltens die Schallemission der Proben während der Belastung.

Die Versuche haben ergeben, daß die Probekörper mit zunehmender Druckbeanspruchung geringere Zugkräfte aufnehmen können.

Die Ergebnisse der Messungen der Verformungen während der Durchführung der Zugversuche haben ergeben, daß die Probekörperinstallation sehr großen Einfluß auf die Verformungen ausübt und darüberhinaus, daß Biegebeanspruchungen der Proben nur durch sorgfältigsten Einbau kleingehalten werden können. - Ganz ließen sie sich bei keinem der Versuche vermeiden.

Die Schallemissionsmessungen zeigten deutlich das Einsetzen der Rißbildung während der Belastung der Probekörper an. Aus den Meßergebnissen konnte abgeleitet werden, daß insbesondere Mikrorißbildung bei den in Druckrichtung hoch vorbelasteten Proben bereits im Bereich kleiner Zugspannungen einsetzt und sich mehr oder weniger kontinuierlich bis zur Ausbildung eines sich dann später über den

gesamten Probenquerschnitt erstreckenden Trennriß fortsetzt. Die Ergebnisse der Schallemissionsmessungen zeigen weiter, daß die Proben trotz vorhandenem Riß noch weiterhin relativ hohe Zugspannungen aufnehmen können und daß erst nach Überwindung der Haftung zwischen Matrix und Stahlfasern ein Versagen der Proben eintritt.

Schrifttum

- [1] Schneider, U.; Diederichs, U.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.: Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148, Brandverhalten von Bauteilen. Teilprojekt B3, S. 120 ff, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Mai 1983.

- [2] Schneider, U.; Rosenberger, W.; Diederichs, U.: Untersuchungen der Rißkinetik in Beton durch Schallemissionsanalyse. Mitteilungsblatt für die Amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, Heft 20/21, S. 44 - 51, Clausthal-Zellerfeld, 1980/81.

- [3] Diederichs, U.; Schneider, U.; Terrien, M.: Formation and Propagation of Cracks and Acoustic Emission. In: Wittmann (editor): Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1983.

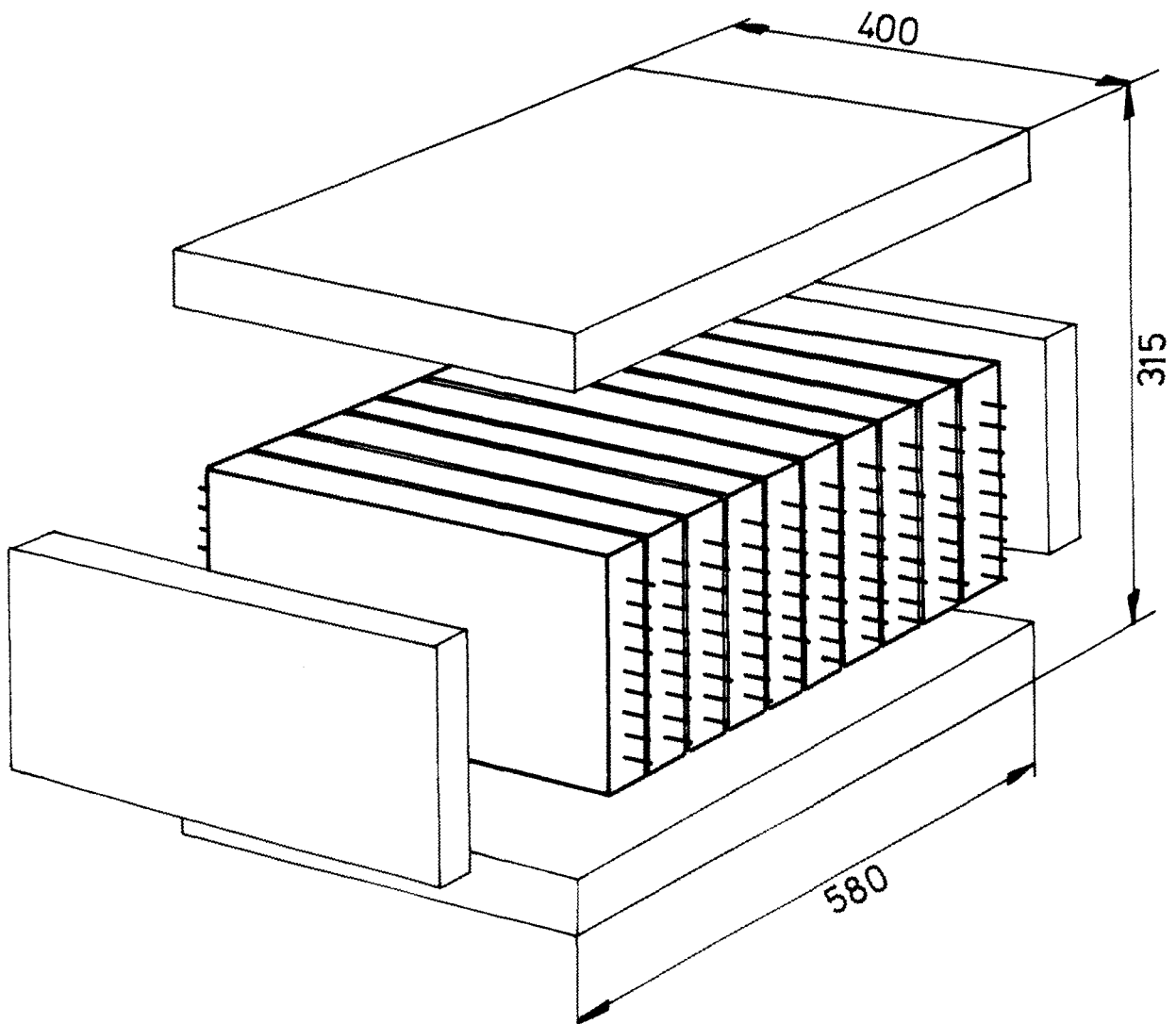


Bild 1: Abmessungen des von der Firma HOCHTIEF AG hergestellten Stahlfaserbetonblocks und Lage der Sägeschnitte.

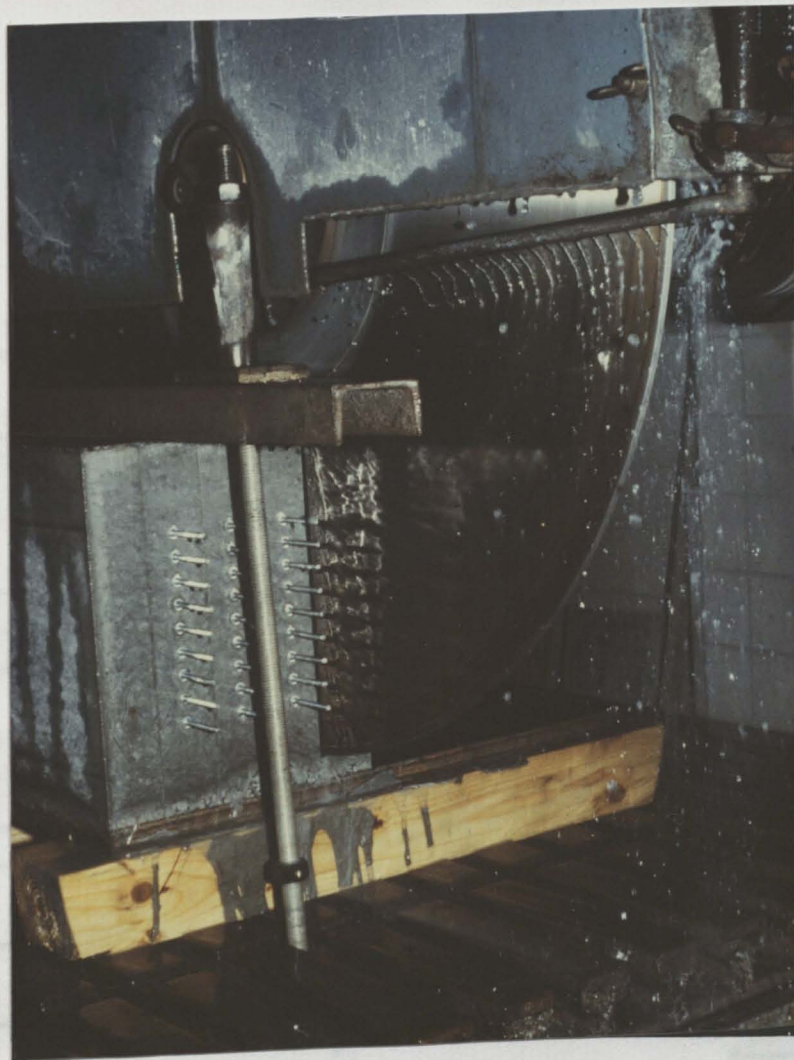


Bild 2: Heraussägen von 49 mm breiten Scheiben aus dem angelieferten Stahlfaserbetonblock (315 x 400 x 580 mm).

Bild 3: Schematische Darstellung der Stahlfaserbetonprobekörper für die durchgeführten Druck-Zug-Versuche.

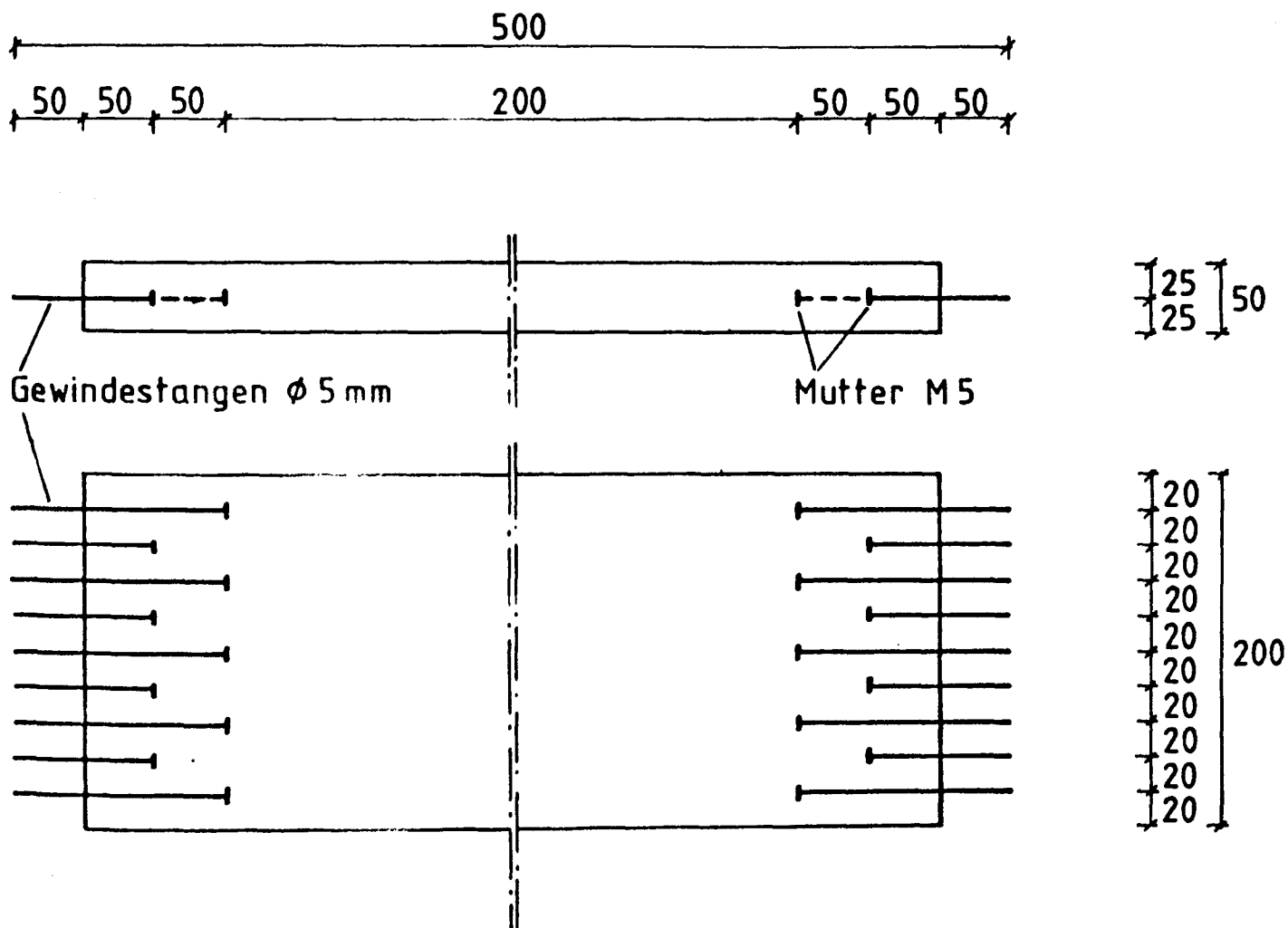


Bild 3: Schematische Darstellung der Stahlfaserbetonprobekörper für die durchgeführten Druck-Zug-Versuche.

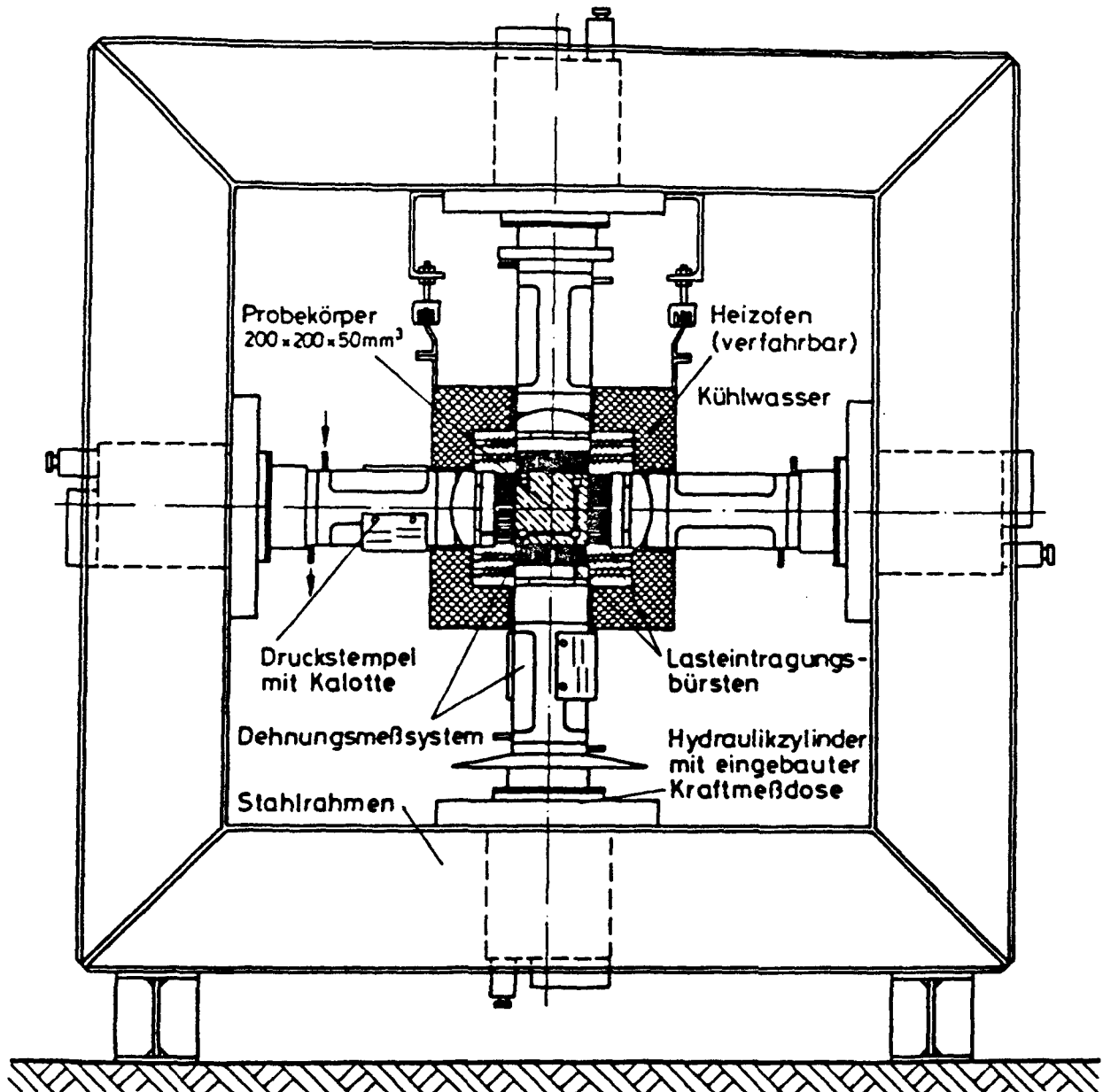
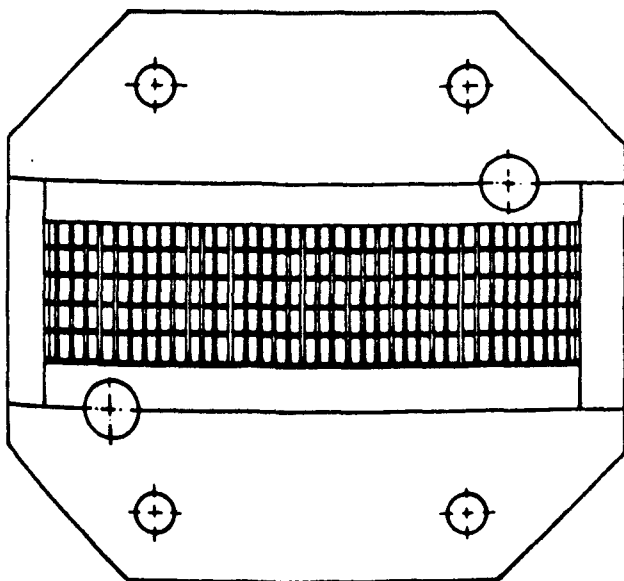
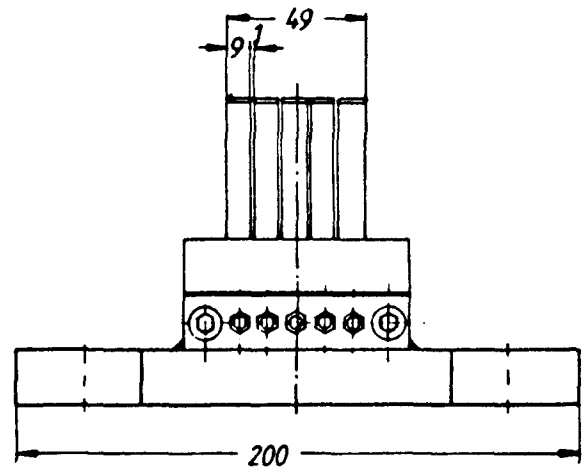
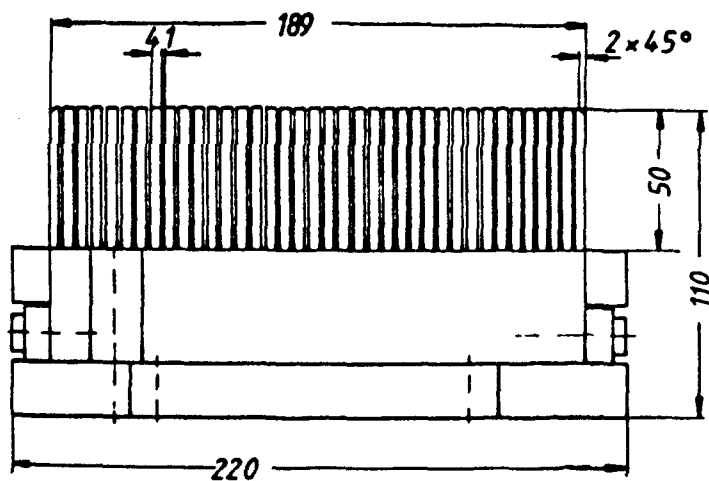


Bild 4: Aufbau des Prüfstandes.



Lasteintragungskonstruktion

Bürste II

Material: X15CrNiSi 25 20

**Einsatz : bis 1000 kN
bis 800 °C**

Bild 5: Belastungsbürsten zur zwängungsarmen Lasteintragung der Druckkräfte.

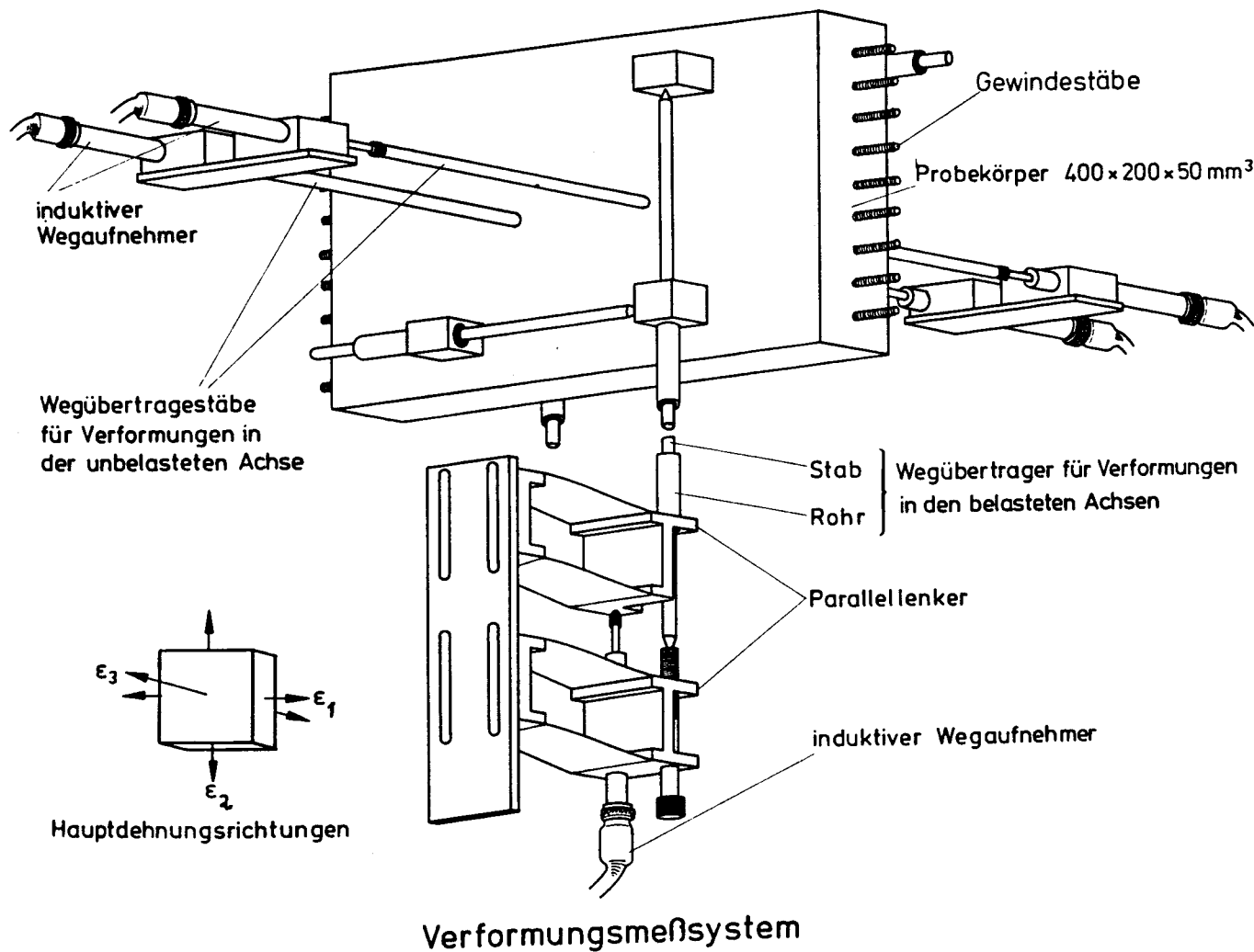


Bild 6: Verformungsmeßsystem

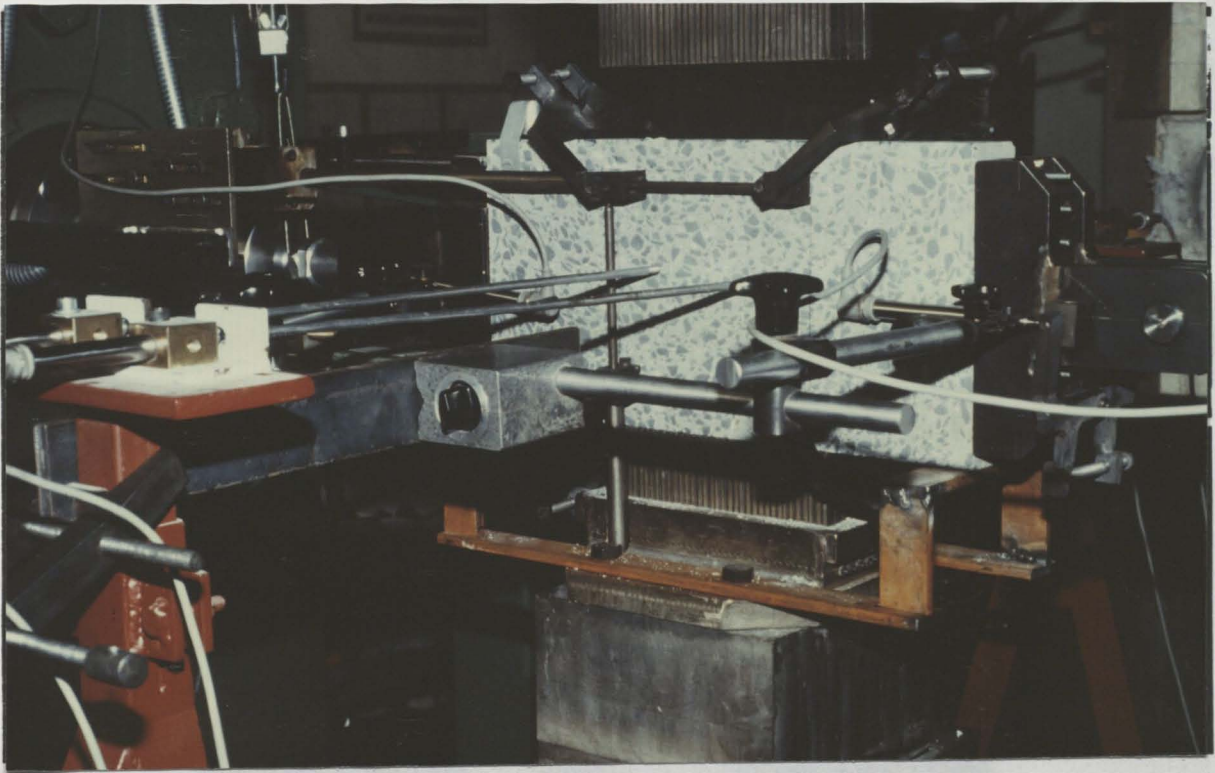


Bild 7: Für die Durchführung eines Zugversuches eingebauter Probekörper mit gemäß Bild 6 installiertem Verformungsmeßsystem.

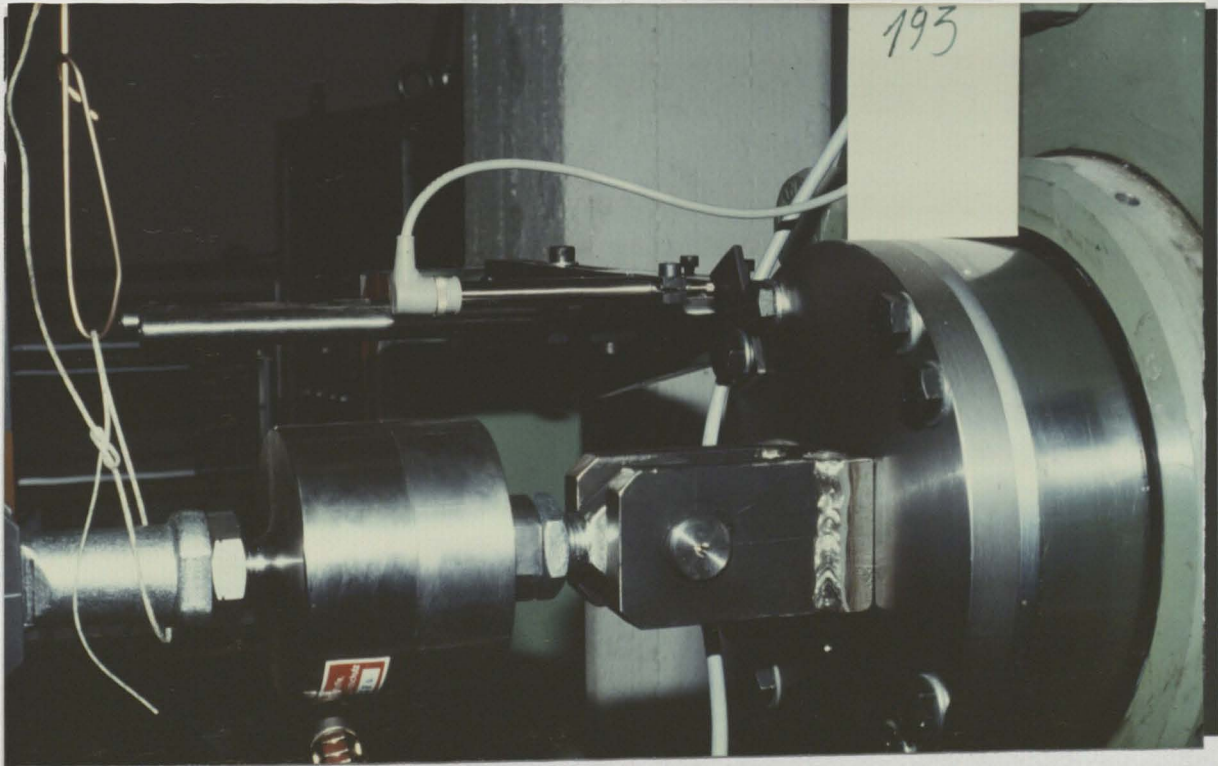


Bild 8: Detailaufnahme des Krafteinleitungssystems sowie der Kraftmeßdose und des Zylinders zur Einleitung und Messung der Zugkräfte.

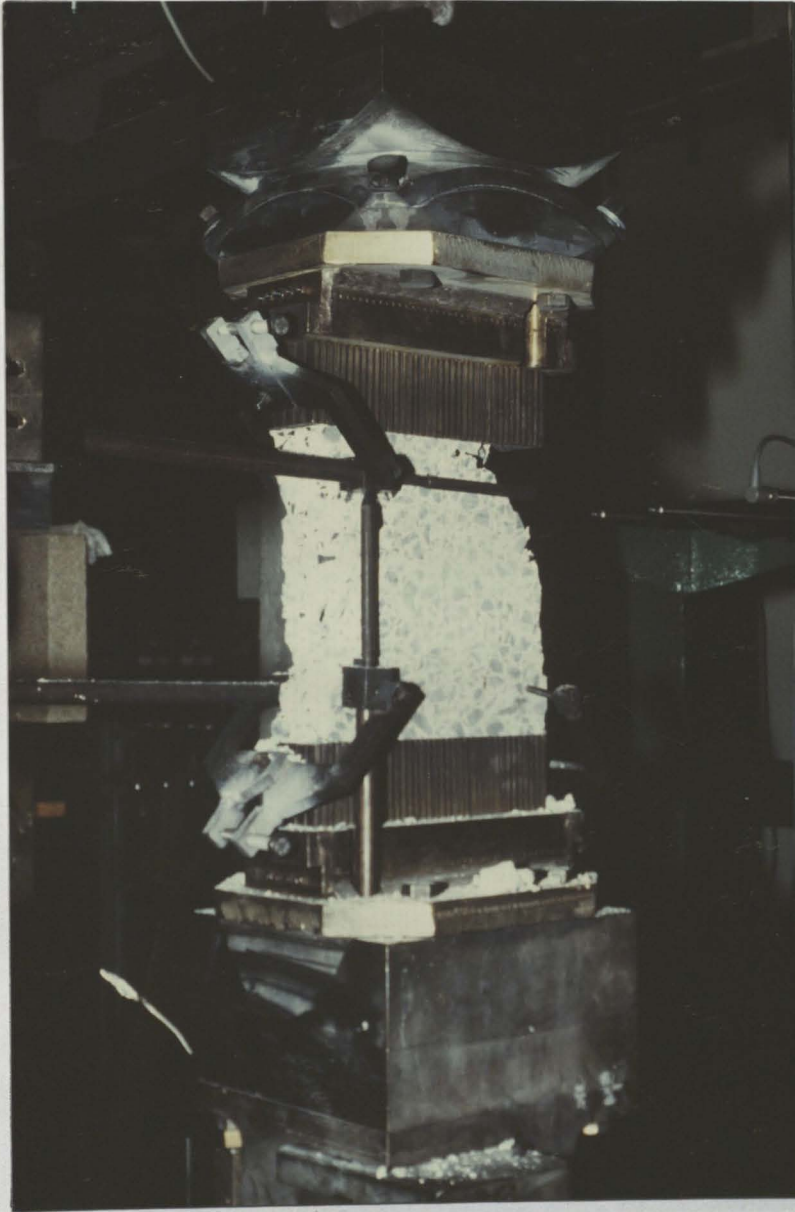


Bild 9: Eingebauter Stahlfaserbetonprobekörper mit installiertem Verformungsmeßsystem nach Durchführung eines einaxialen Druckversuchs.

Tabella 1:

Proben bez.	Druck kN
190	-
192	-
193	-
194	26
195	25
196	12
198	12
199	37
200	37
193' a	52
195' b	48

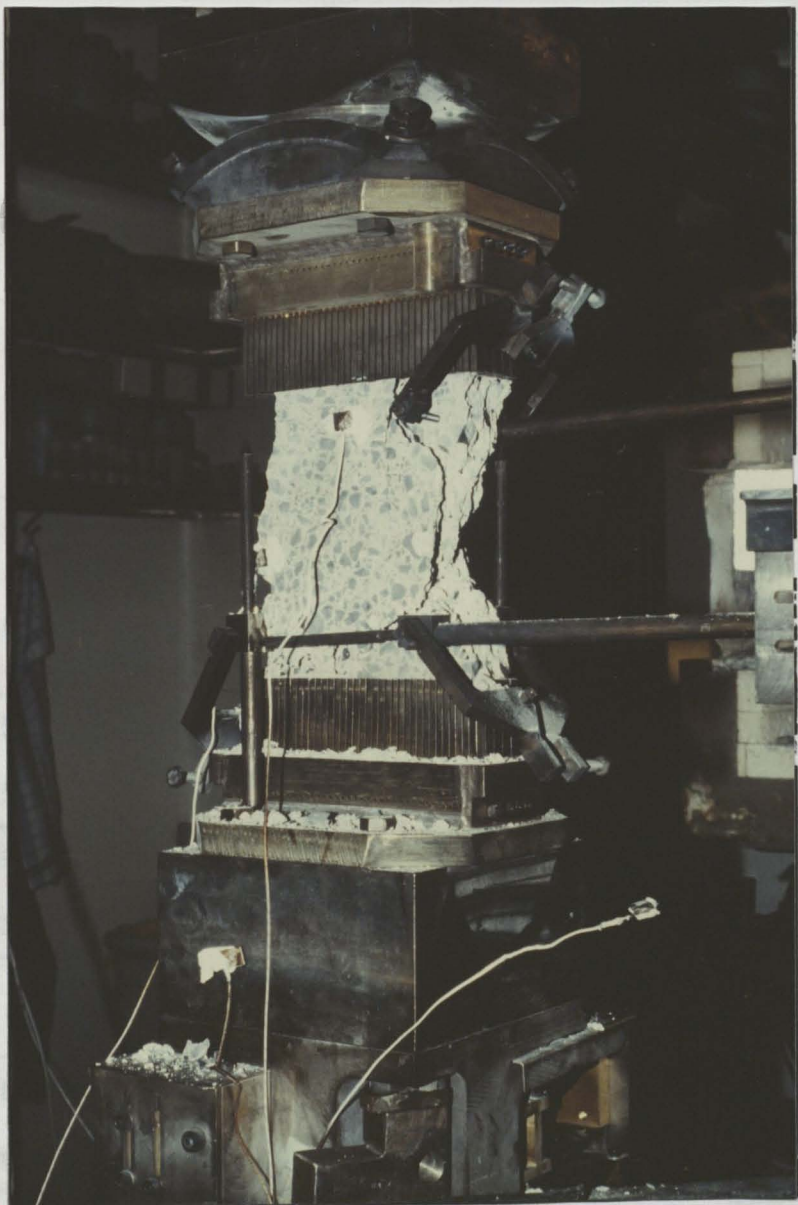


Bild 10: Andere Ansicht des in Bild 9 gezeigten Probekörpers. Deutlich zu erkennen, sind die parallel zur Druckrichtung verlaufenden Rißflächen.

Tabelle 1: Spannungsverhältnisse und Bruchspannungen der untersuchten Stahlfaserbetonproben.

Proben bez.	Druckkraft kN	Druckkraft % von $\bar{\sigma}_{d,u}$	Zugkraft kN	$\sigma_{z,u}$ N/mm ²	Bemerkungen
190	-	0	36,5	3,74	Probenabriß
192	-	0	35,0	3,60	"
193	-	0	35,8	3,66	"
194	265 "	52,0	10,0 16,3	1,03 1,67	erster Anriß Probendurchriß
195	250 "	49,0	6,0 19,3	0,60 1,93	erster Haarriß Probendurchriß
196	125	24,5	20,4	2,11	Probenabriß
198	125	24,5	16,0	1,57	"
199	375	73,5	13,0	1,33	"
200	375	73,5	11,0	1,13	"
				$\sigma_{d,u}$ N/mm ²	
193 a	530	103,9	-	54,4	Druckbruch
195 b	490	96,8	-	49,8	"

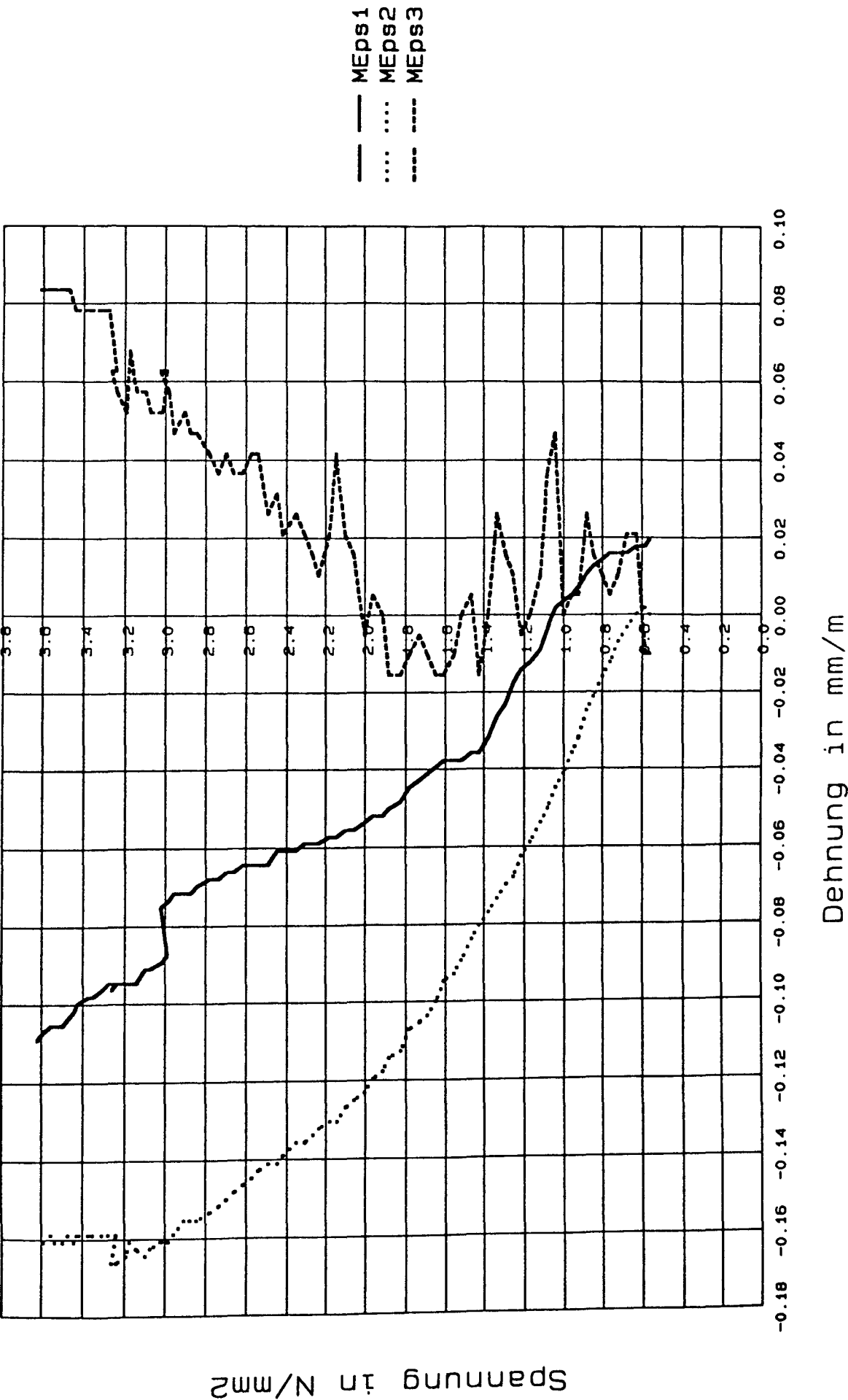


Bild 11: Am Probekörper 190, der unter reinem Zug geprüft worden war, gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien.



Bild 12: Probe 190 nach Durchführung eines einaxialen Zugversuchs.

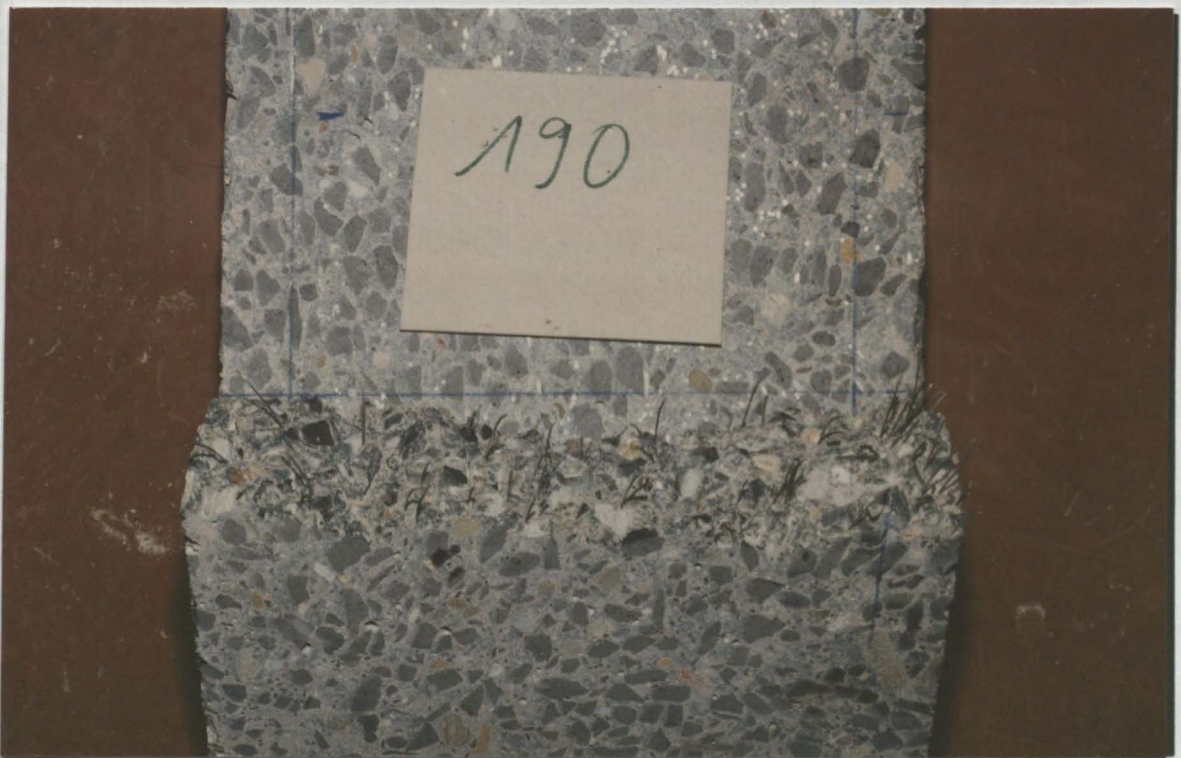


Bild 13: Bruchfläche von Probe 190; es ist zu erkennen, daß der Abriß in der Ebene erfolgt ist, in der die einbetonierten, mit Muttern versehenen Gewindestangen enden.

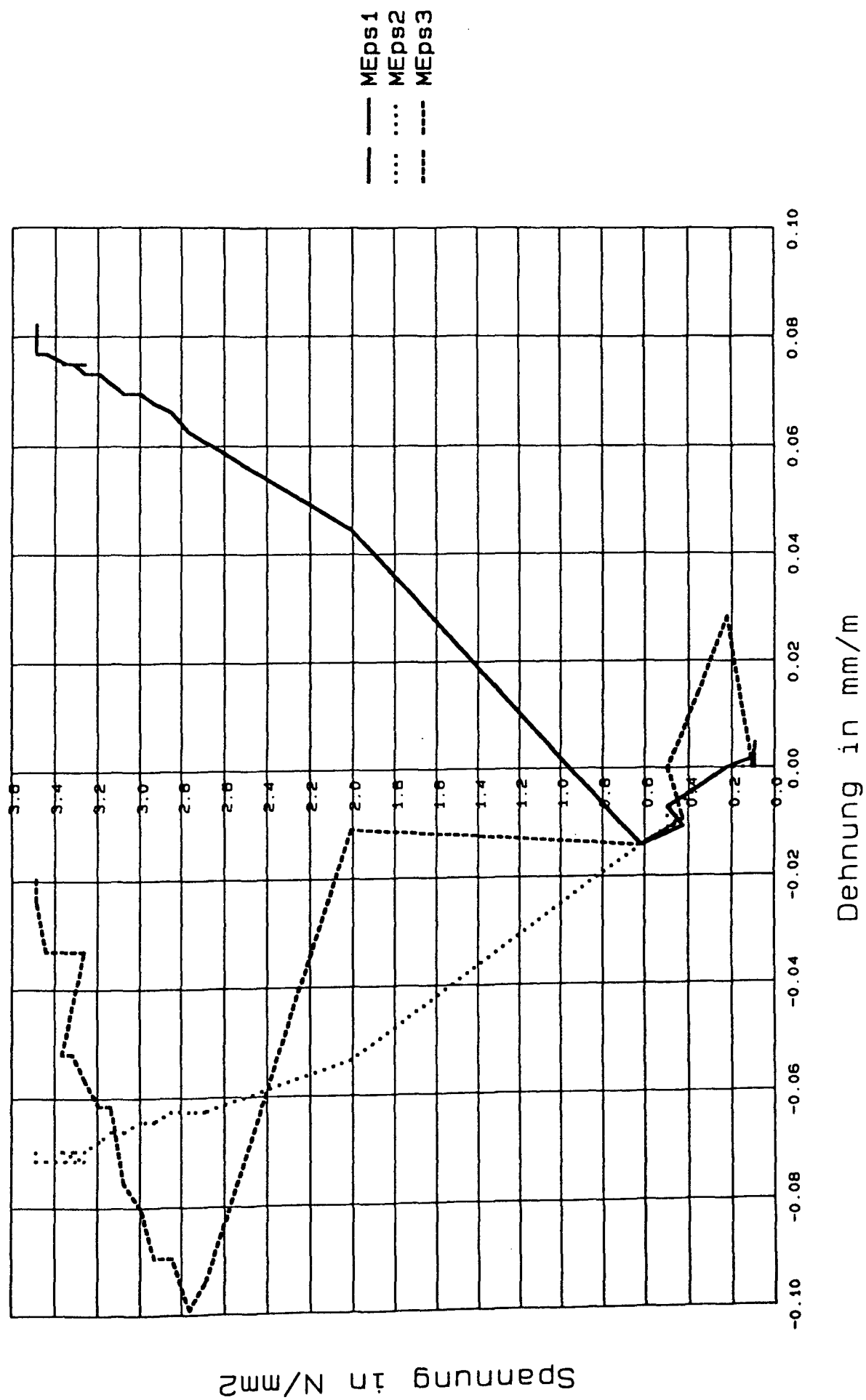


Bild 14: Am Probekörper 192, der unter reinem Zug geprüft worden war, gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien.

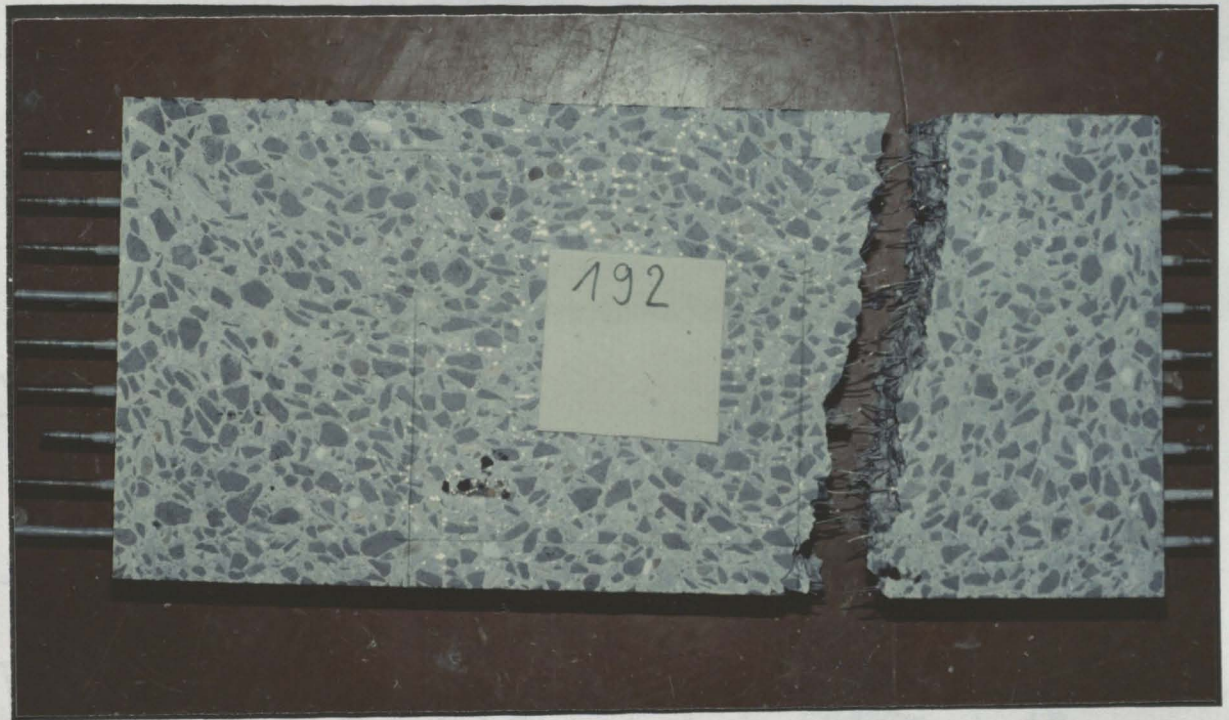


Bild 15: Probe 192 nach Durchführung eines einaxialen Zugversuchs. Der Bruch trat hier ebenfalls in der Ebene ein, in der die mit Muttern versehenen einbetonierten Gewindestangen enden.

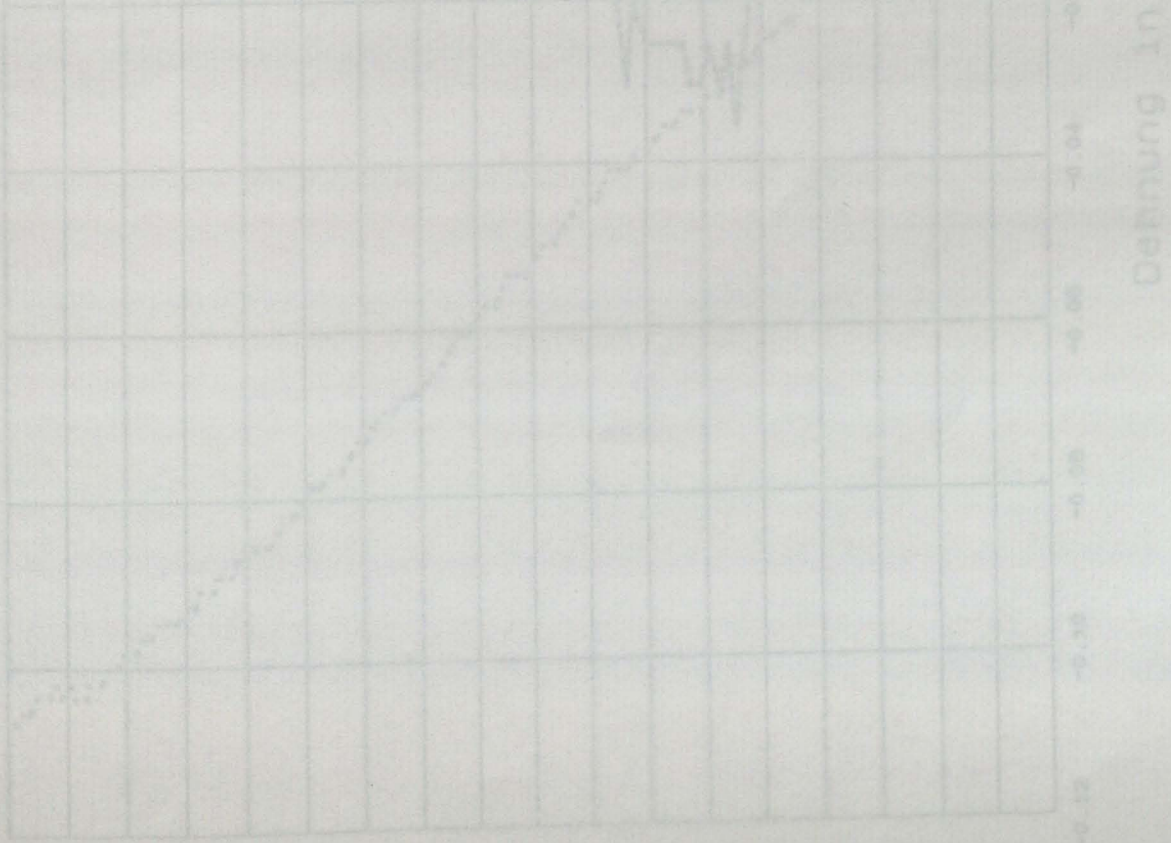


Bild 16: Am Probekörper 192, der unter reinem Zug geprüft wurde, gemessene Spannungs-Dehnungs-Linie.

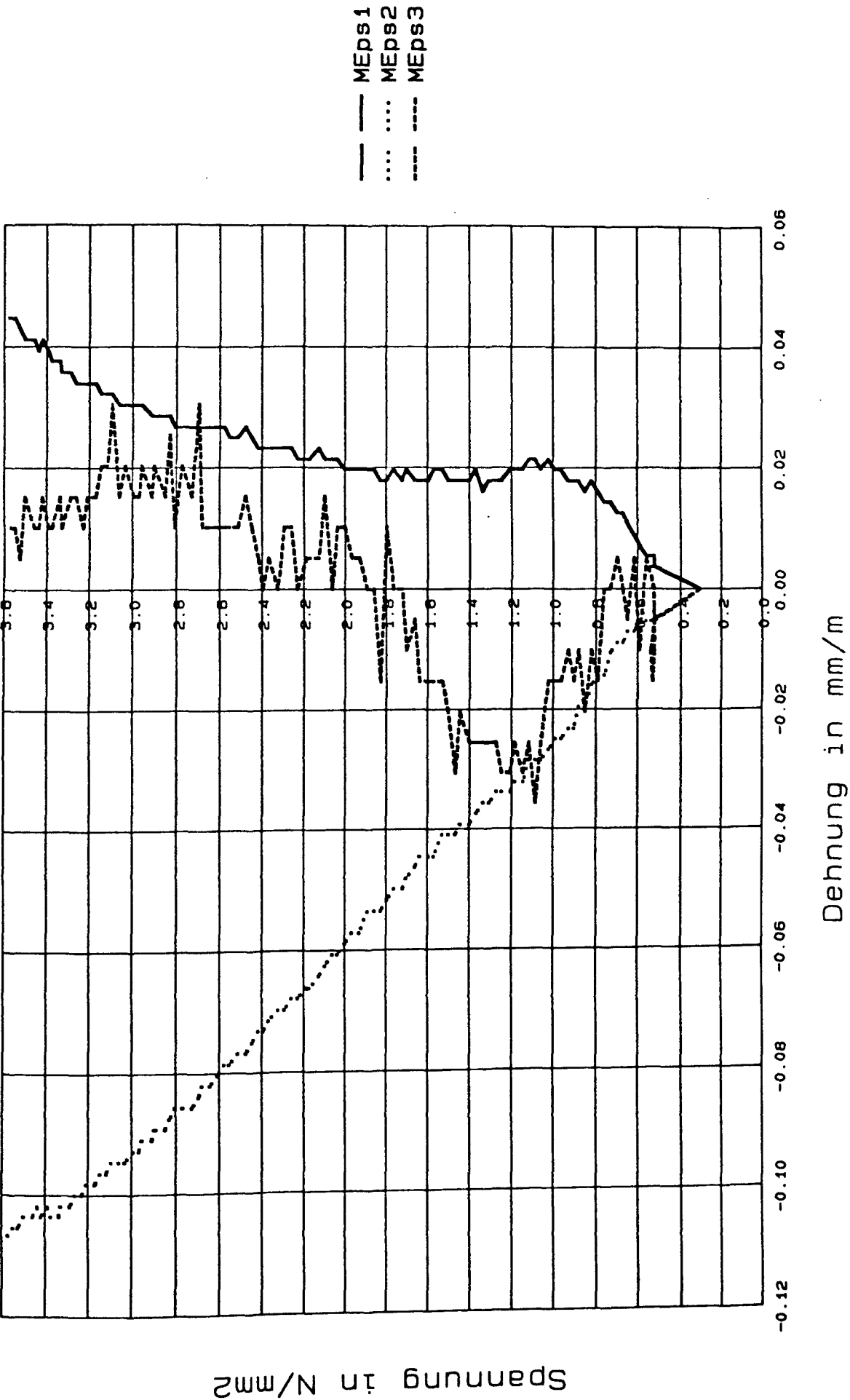


Bild 16: Am Probekörper 193, der unter reinem Zug geprüft worden war, gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien.

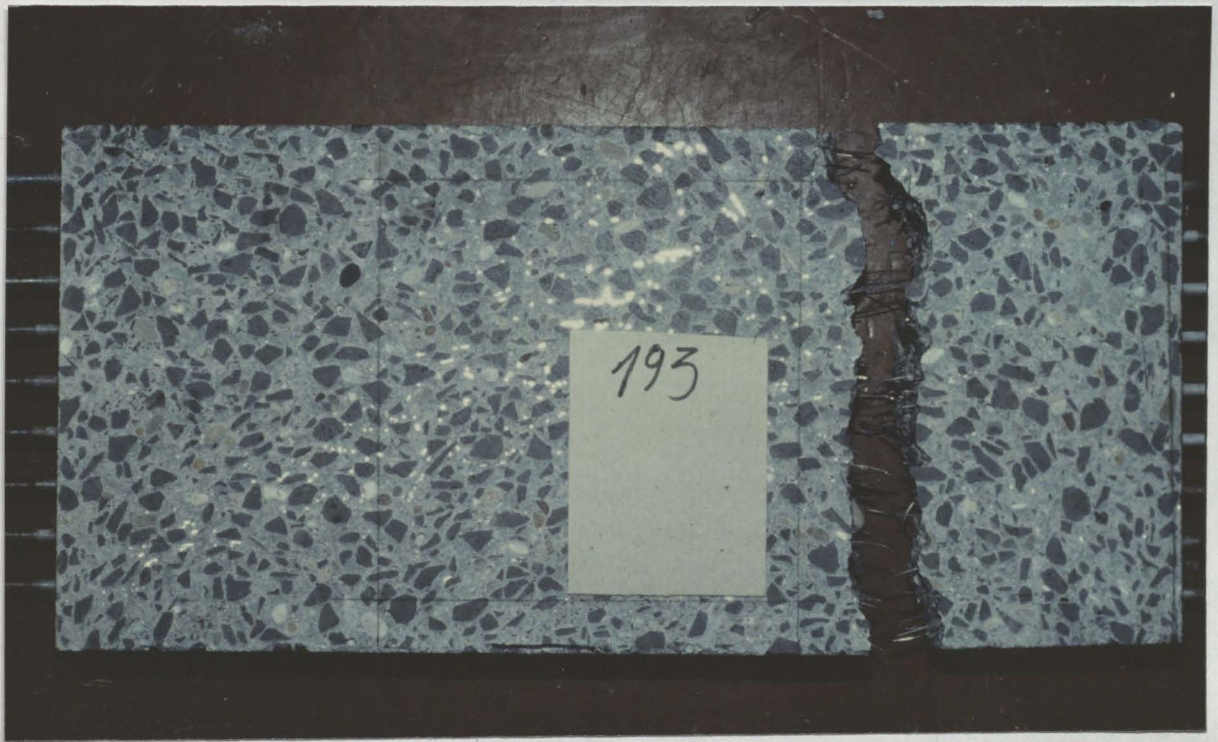


Bild 17: Probe 193 nach Durchführung eines einaxialen Zugversuchs; der Abriß ist in der Ebene, in der die mit Muttern versehenen einbetonierten Gewindestangen enden, eingetreten. Die linke Hälfte der gezeigten Probe wurde auf 200 x 200 49 mm geschnitten und zur Durchführung eines einaxialen Druckversuchs verwendet.

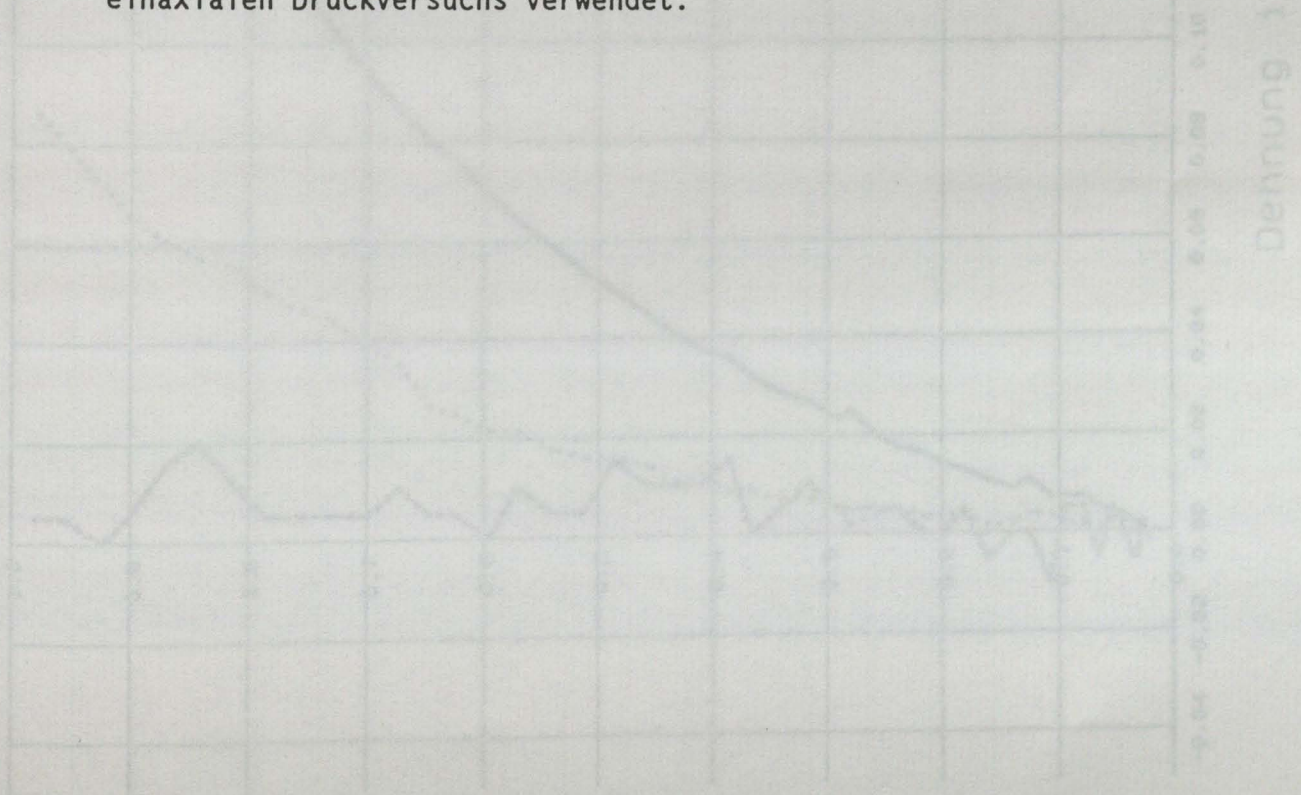


Bild 18: Am Probekörper 193 bis zur Ausbildung des ersten Abrißs gemessene Spannungs-Dehnungs-Linie. Die Probe wurde unter Belastung von ca. 10 % der Kurzzeitdruckfestigkeit in Zugversuch geprüft.

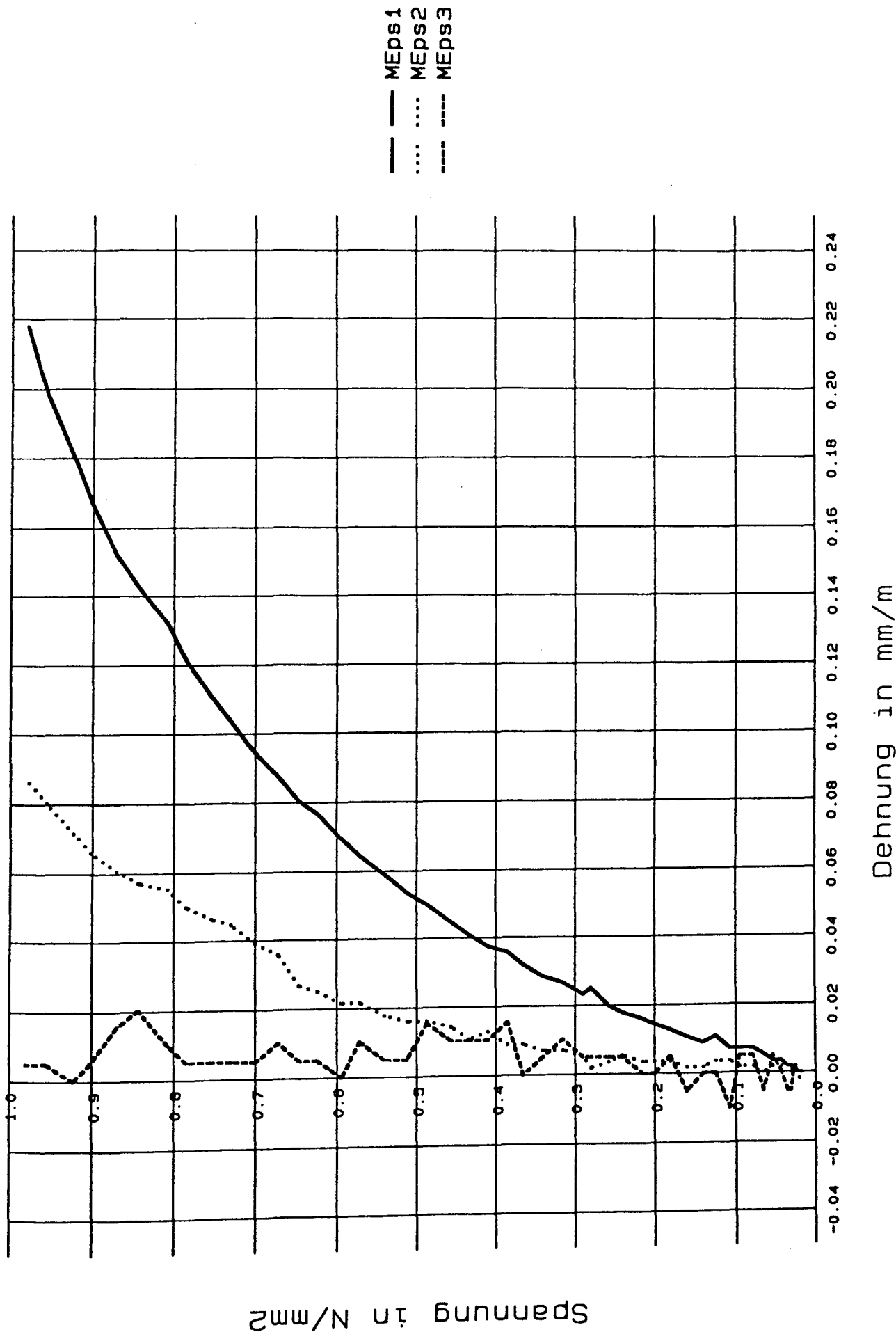


Bild 18: Am Probekörper 194 bis zur Ausbildung des ersten Anriß gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Belastung von rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

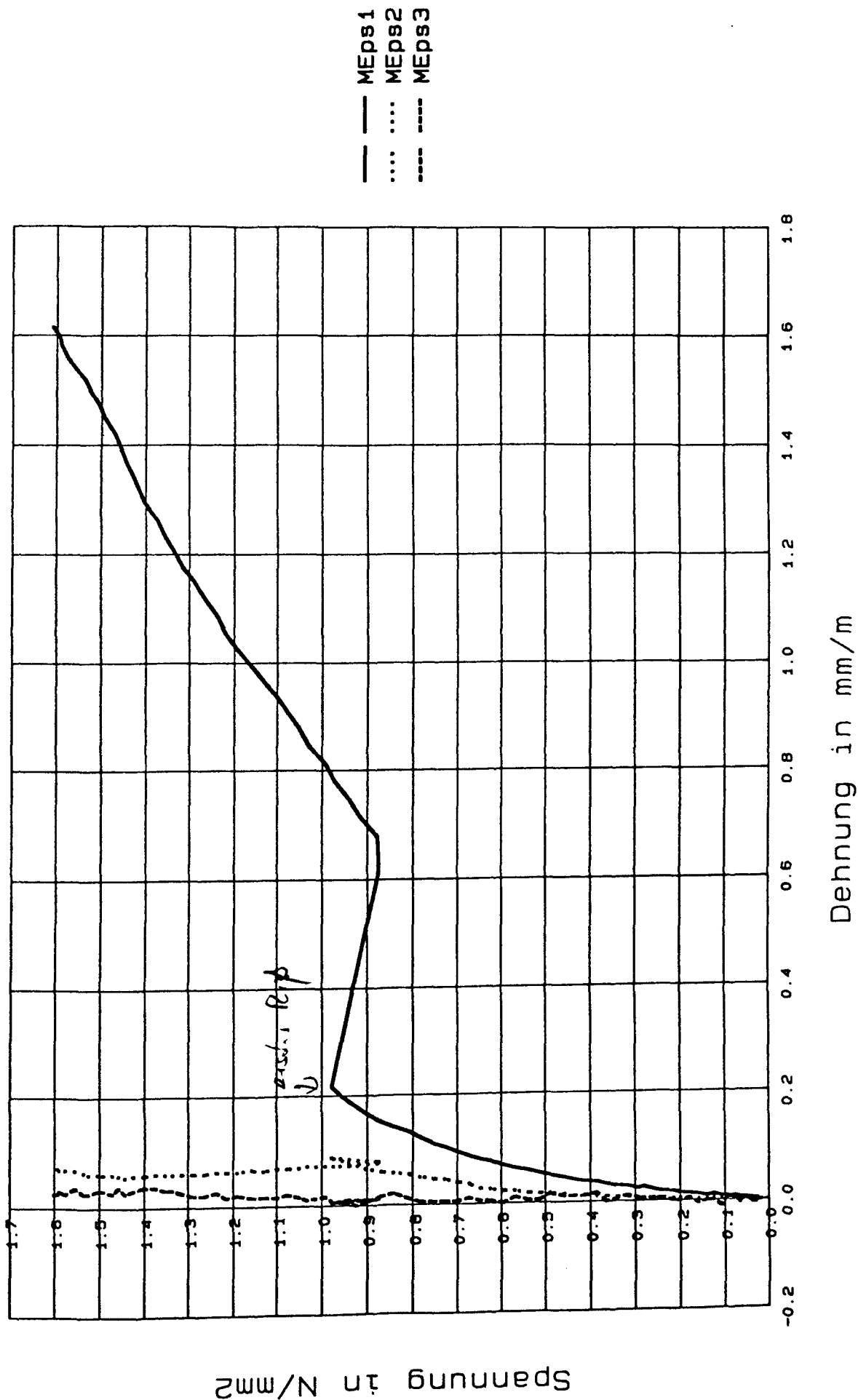


Bild 19: Am Probekörper 194 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Der Probekörper wurde unter Belastung von rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

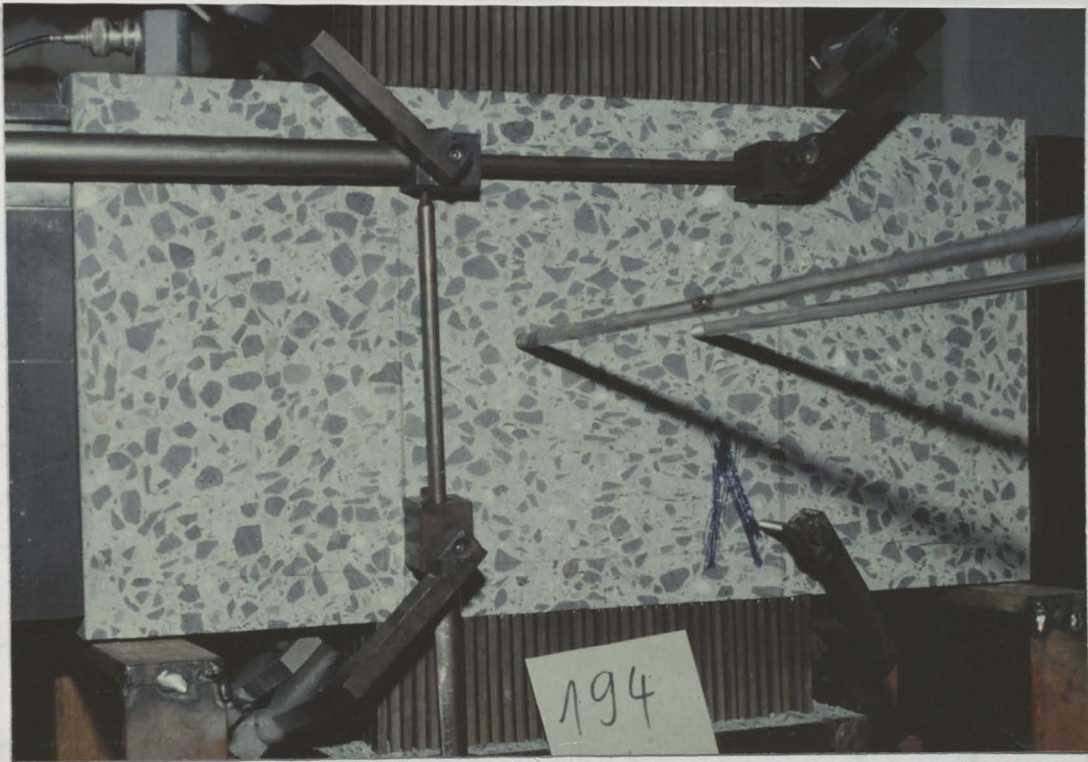


Bild 20: Probe 194 nach Durchführung eines Zugversuchs unter gleichzeitiger Druckbeanspruchung.

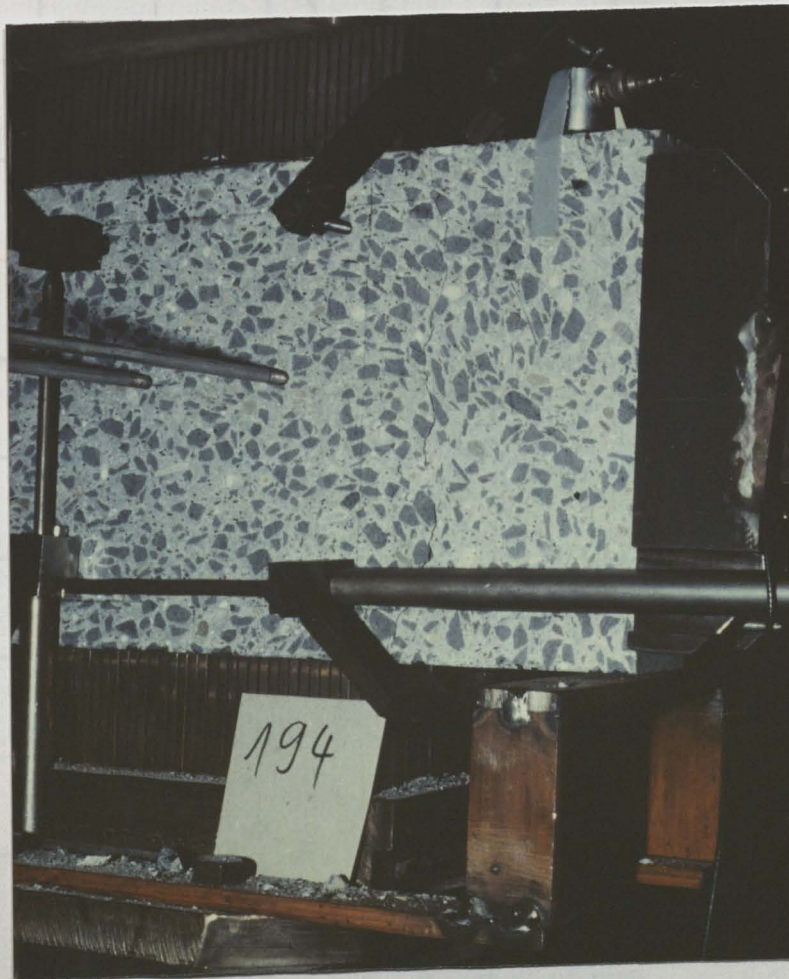


Bild 21: Gleicher Probekörper wie oben (rückseitige Ansicht, rechts oben auf dem Probekörper ist der Schallaufnehmer zu erkennen); auf der rechten Seite ist ein durchgehender Riß in der Probe zu erkennen.

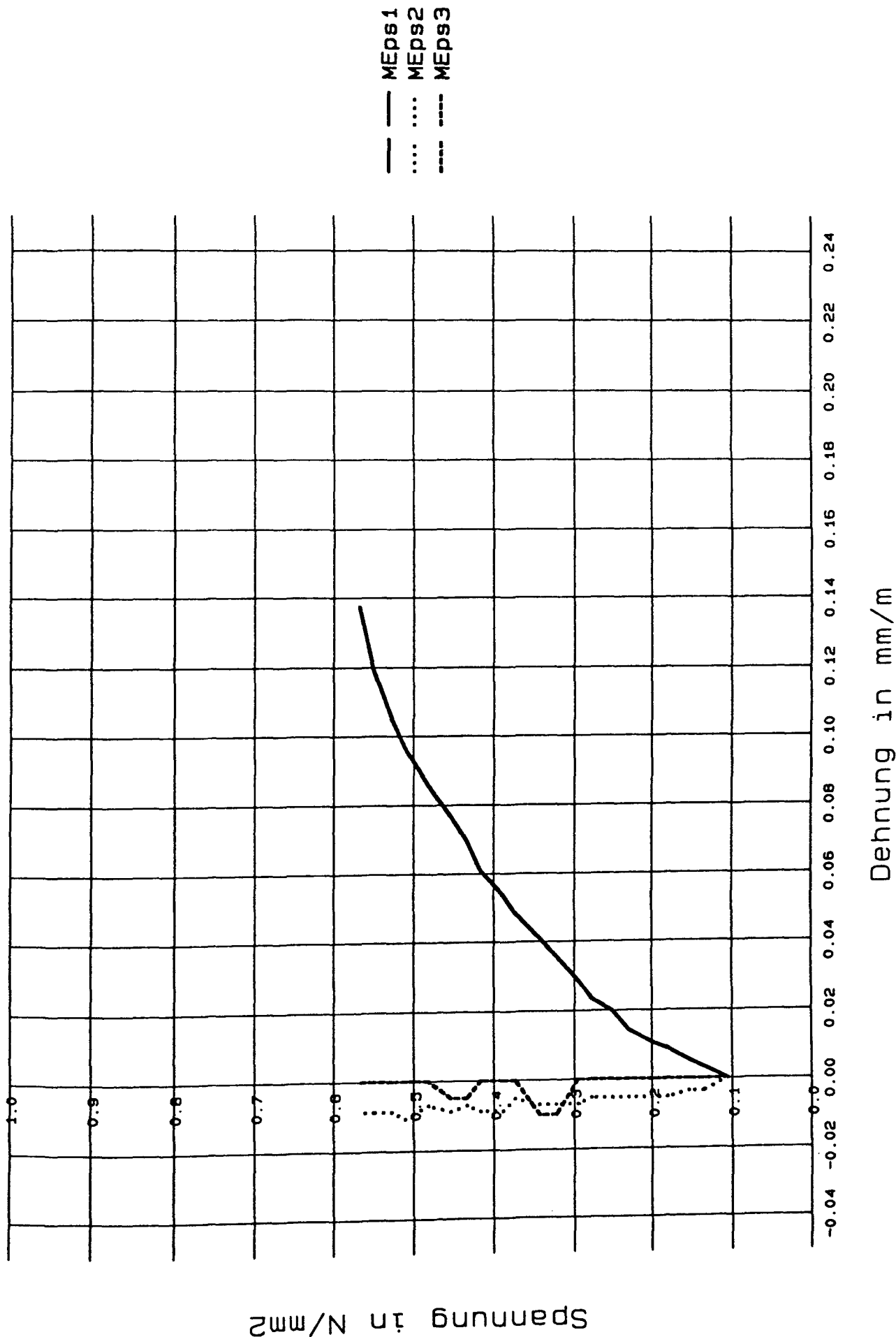


Bild 22: Am Probekörper 195 bis zur Ausbildung eines ersten Anrisses in Probenmitte gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. - Die Probe wurde unter Belastung von rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

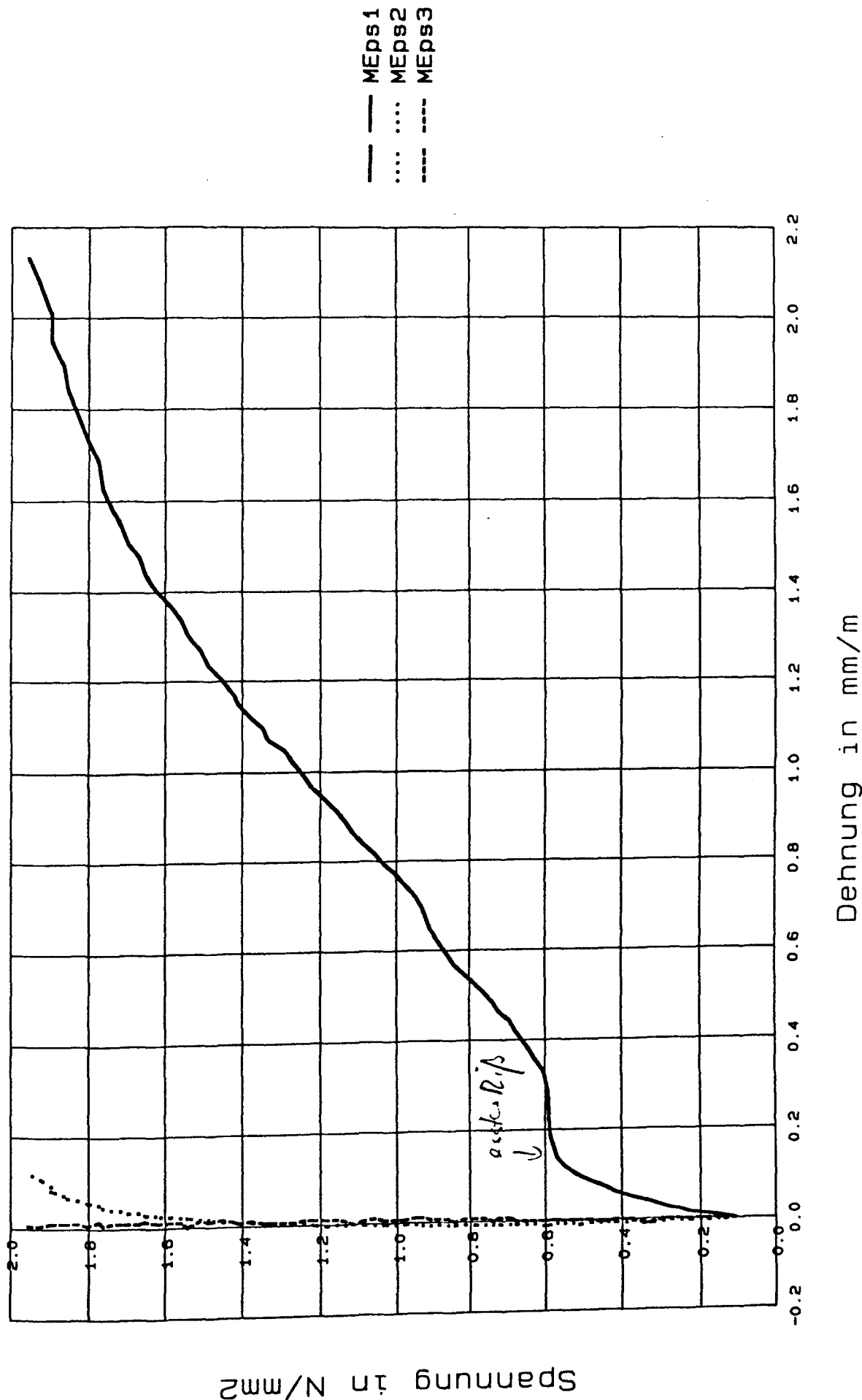


Bild 23: Am Probekörper 195 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Belastung von rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

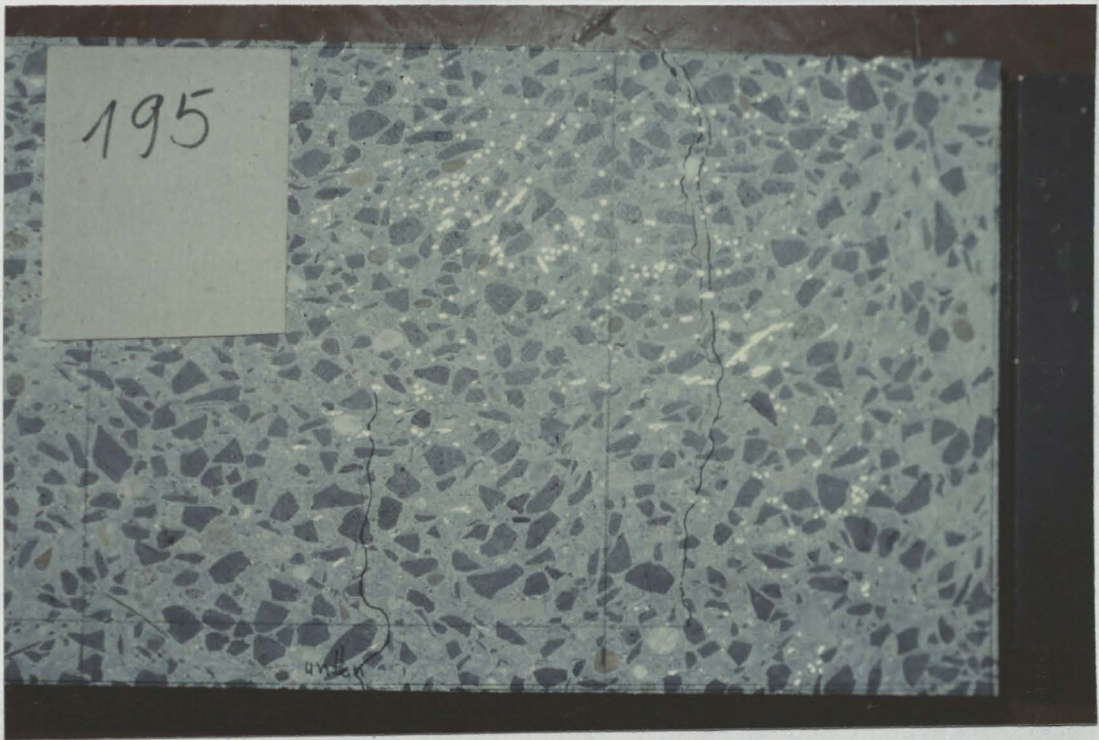


Bild 24: Probe 195 nach Durchführung des Zugversuches. Im Probenmitte erfolgte bei einer Zugbeanspruchung von rd. $0,6 \text{ N/mm}^2$ ein erster Anriß. Das endgültige Versagen erfolgte durch Ausbildung des auf der rechten Seite erkennbaren Risses.

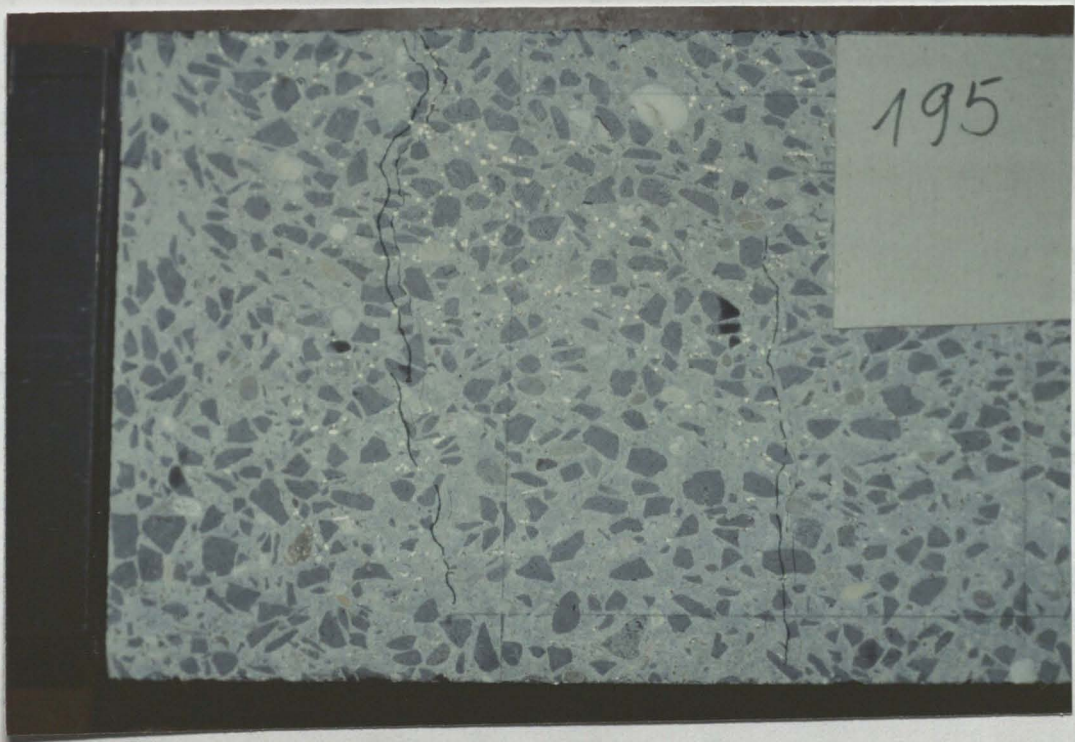


Bild 25: Rückwärtige Seite des in Bild 24 gezeigten Probekörpers.

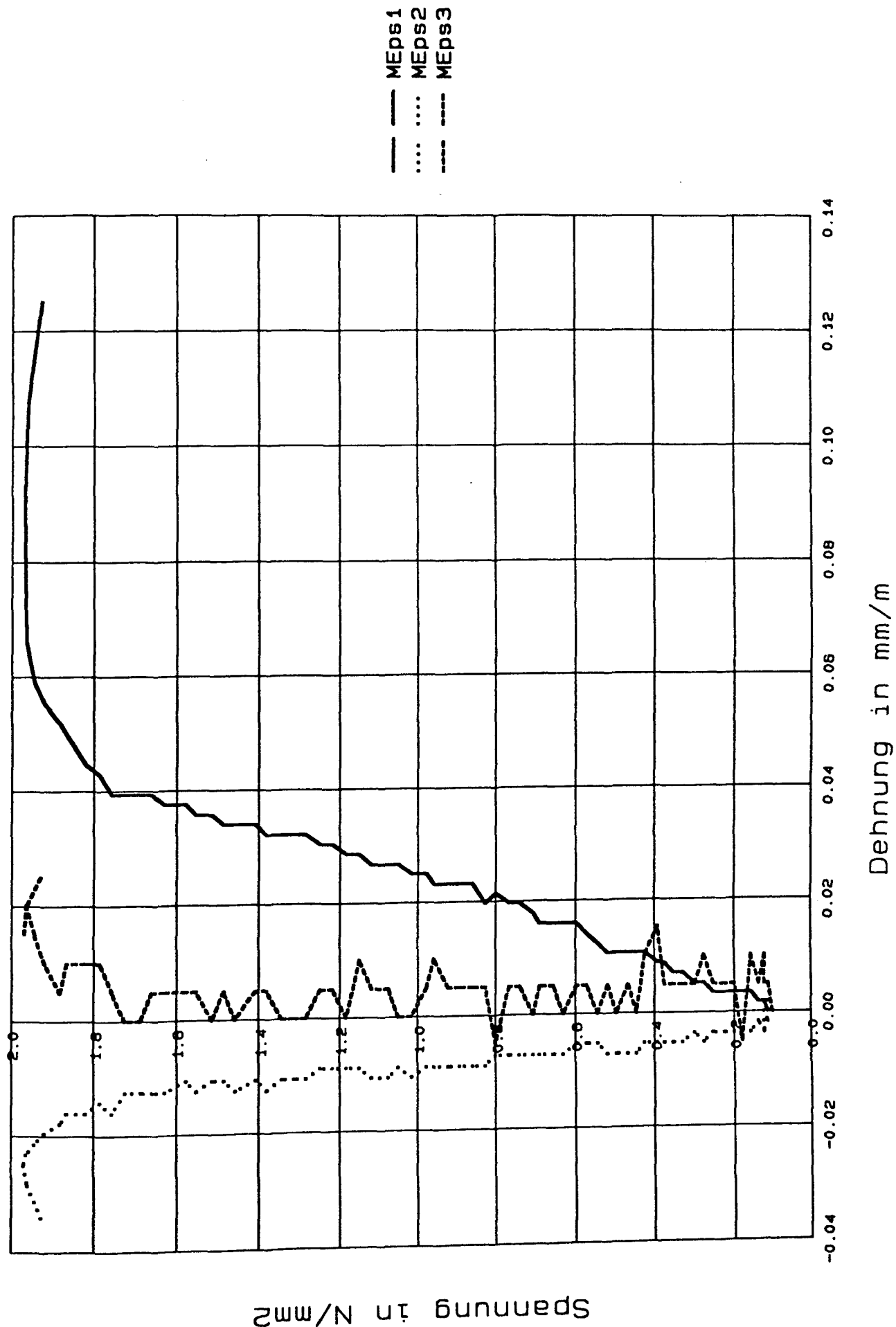


Bild 26: Am Probekörper 196 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Druckbelastung von rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

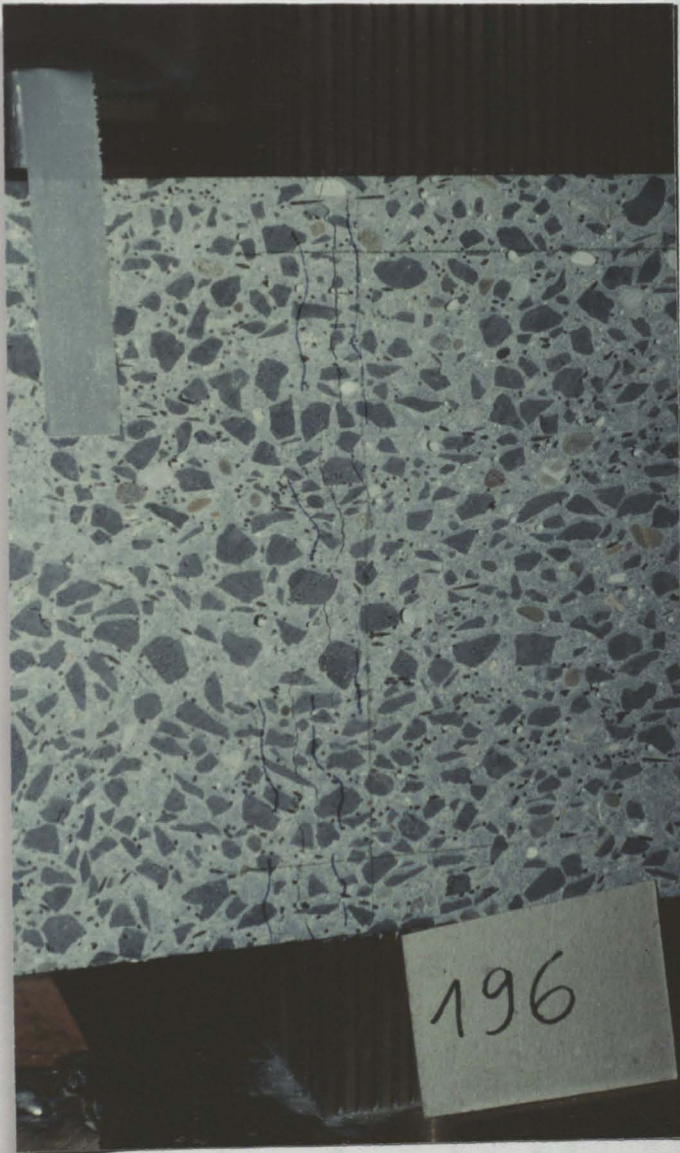


Bild 27:
Probe 196 nach Durchführung des Zugversuchs. Der Probekörper versagte im Übergangsbereich freie Probenlänge/äußerer Borsten der Belastungsbürste.

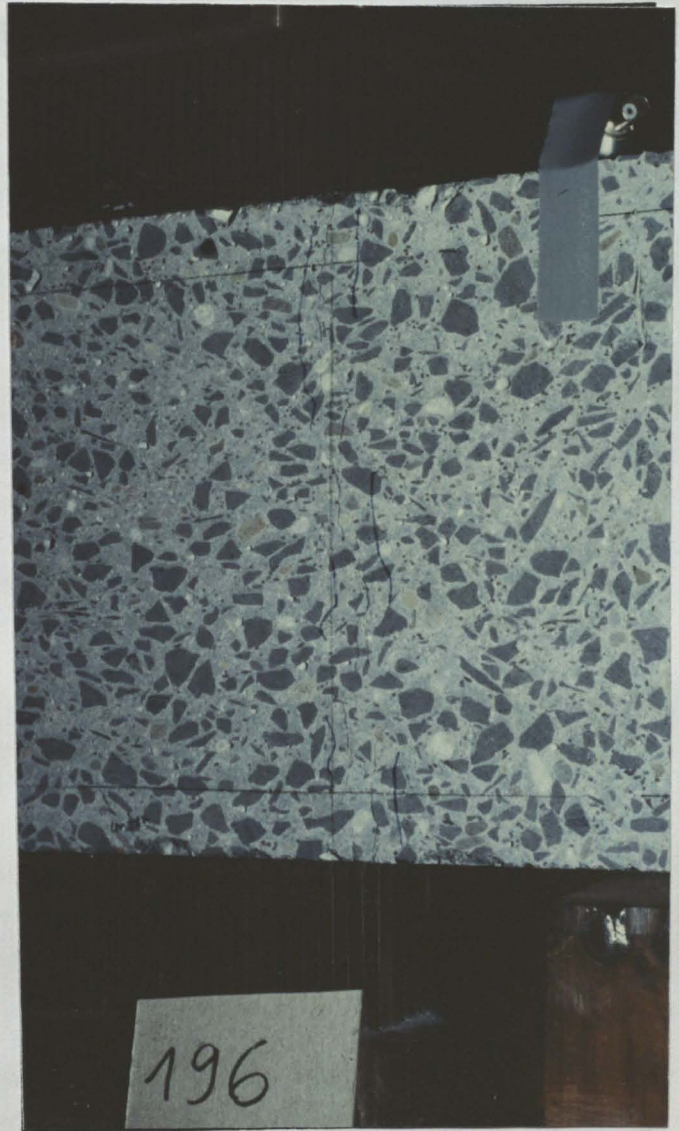


Bild 28
Rückwärtige Seite des in Bild 27 gezeigten Probekörpers.

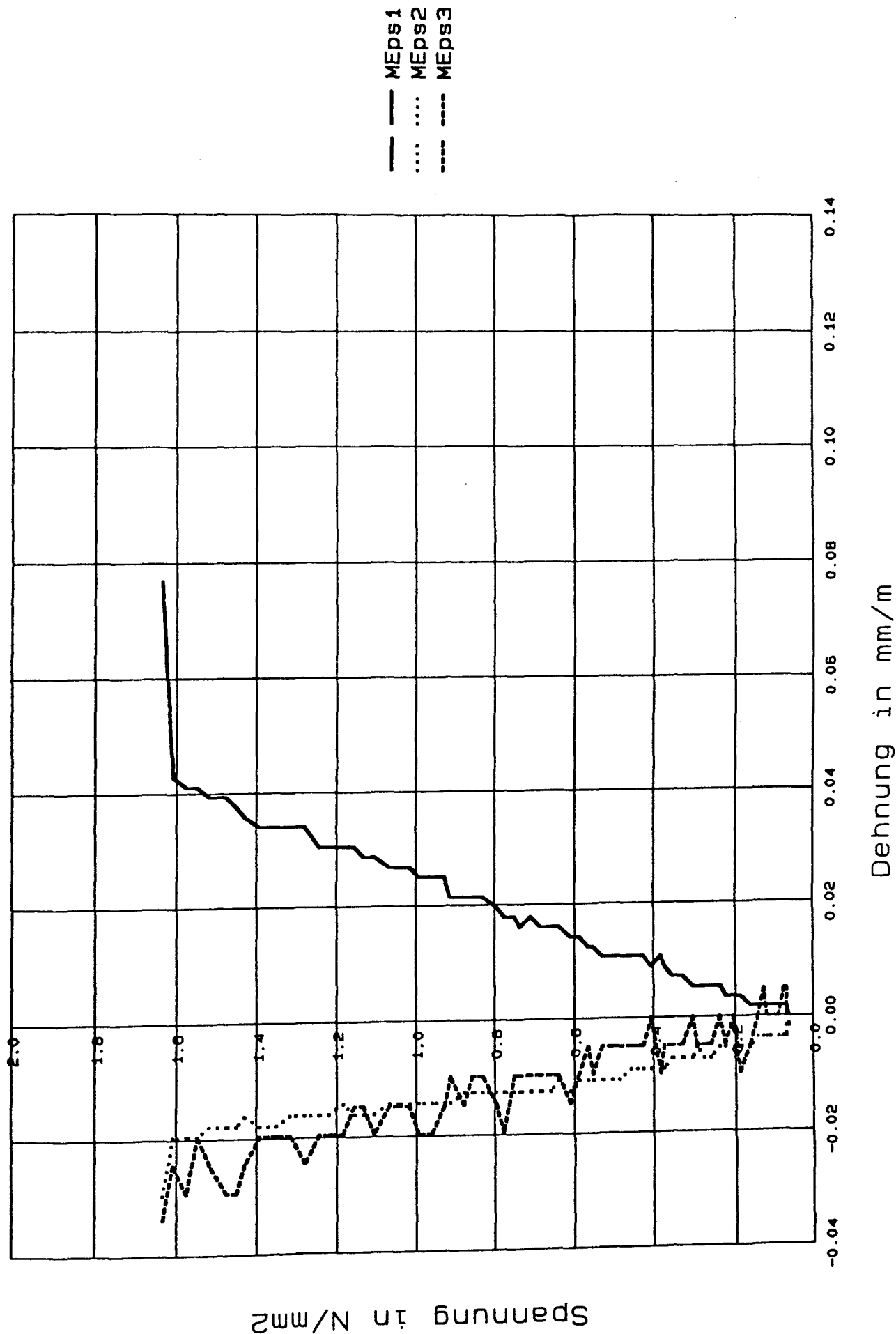


Bild 29: Am Probekörper 198 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Druckbelastung von rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

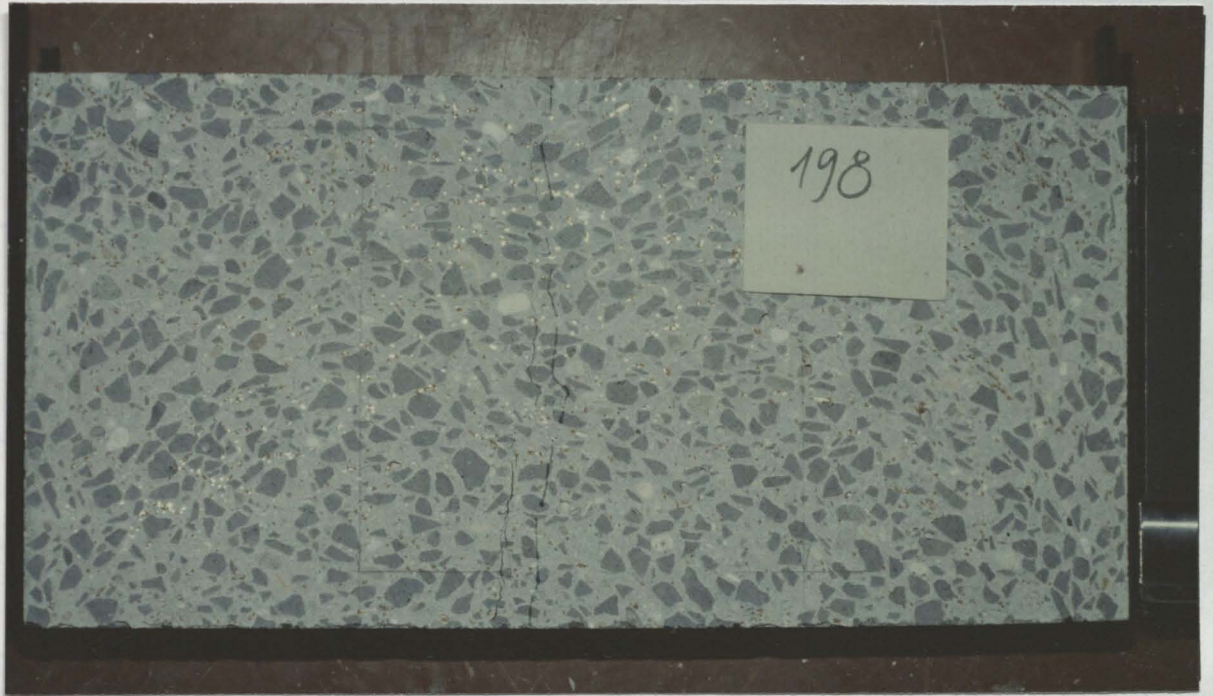


Bild 30: Probe 198 nach Durchführung des Zugversuchs. Das Versagen der Probe trat durch Längsrißbildung in der Probenmitte ein.

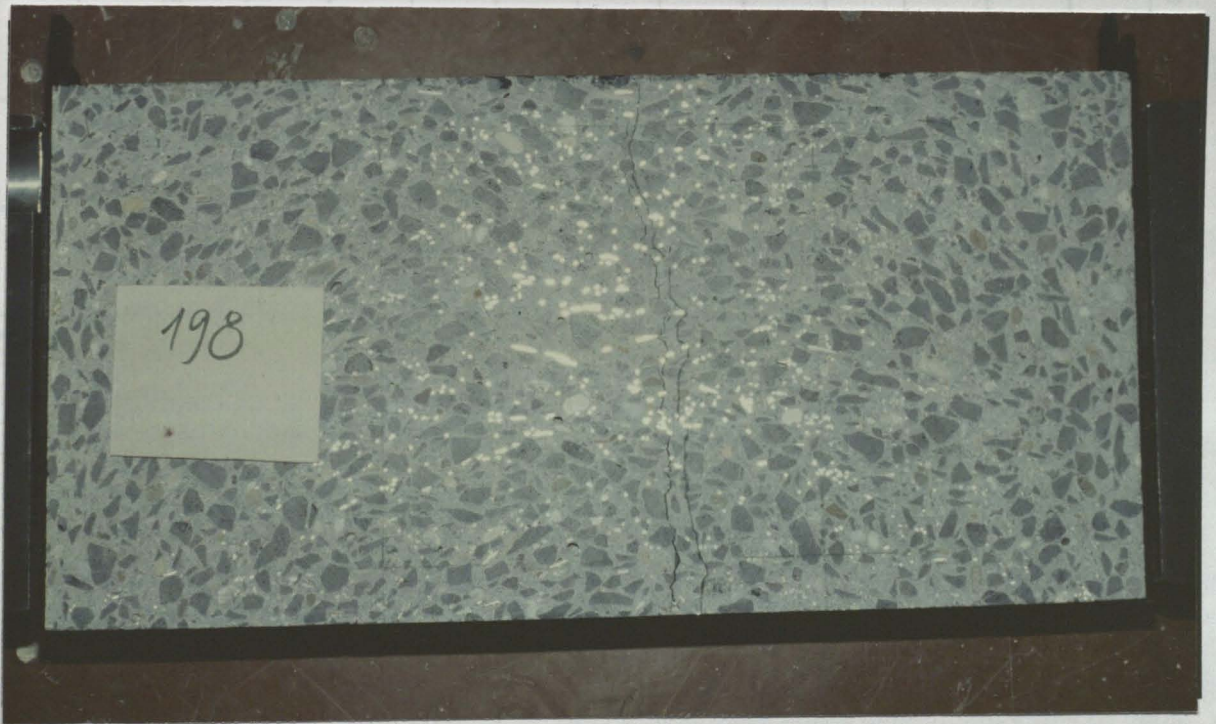
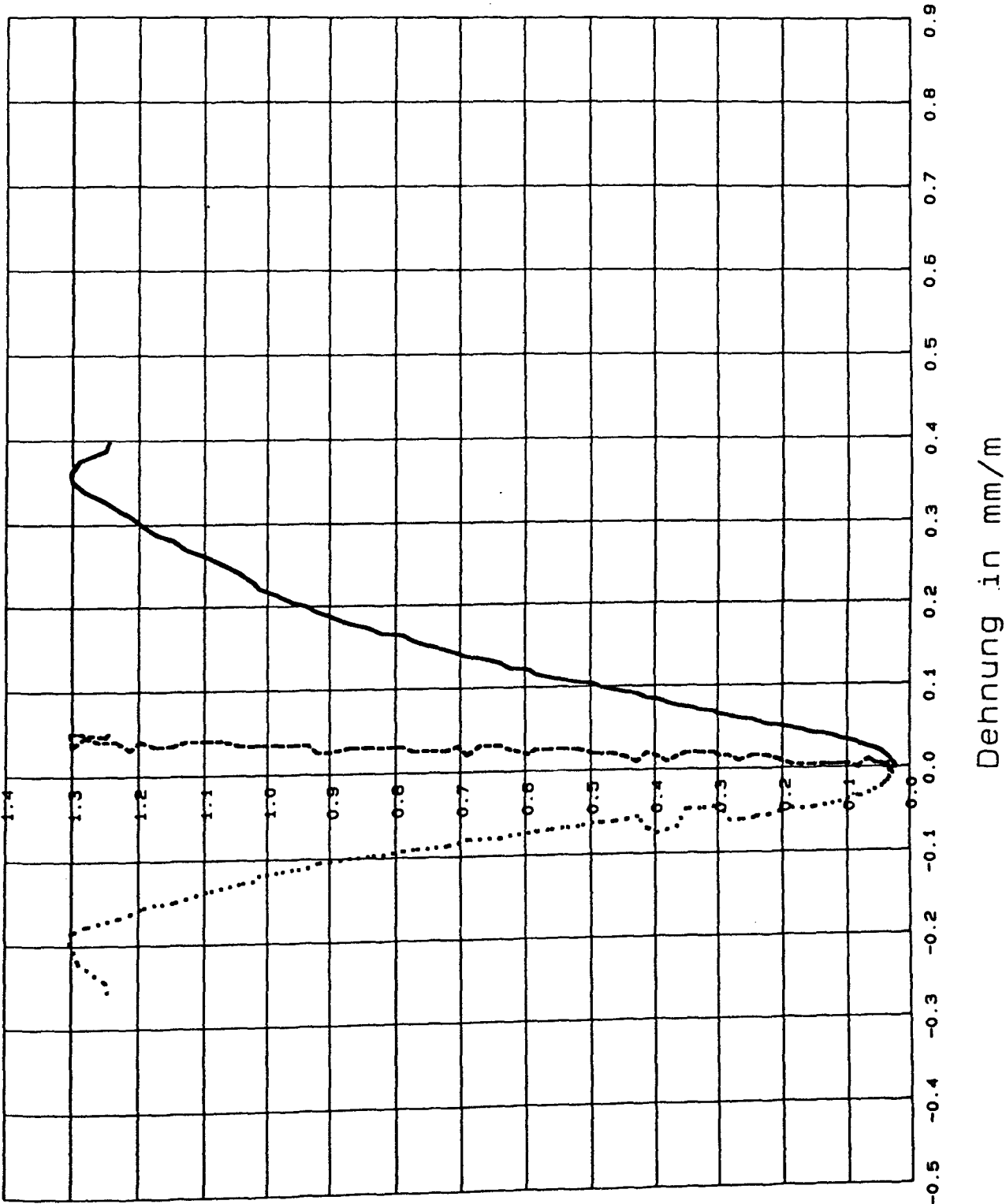


Bild 31: Rückwärtige Seite des in Bild 30 gezeigten Probekörpers.

MEps1
MEps2
MEps3



Spannung in N/mm²

Bild 32: Am Probekörper 199 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Druckbelastung von rd. 75 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.

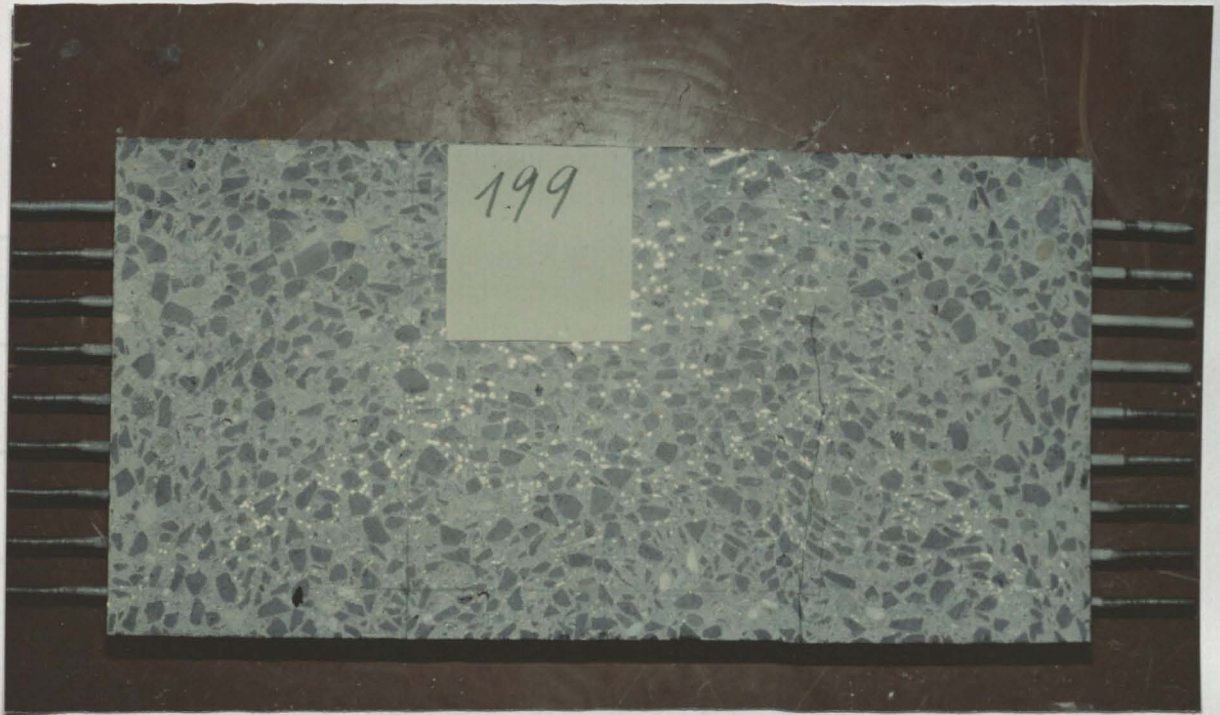


Bild 33: Probe 199 nach Durchführung des Zugversuchs. Das Versagen der Probe trat durch Rißbildung am Rand der druckbelasteten Fläche auf.

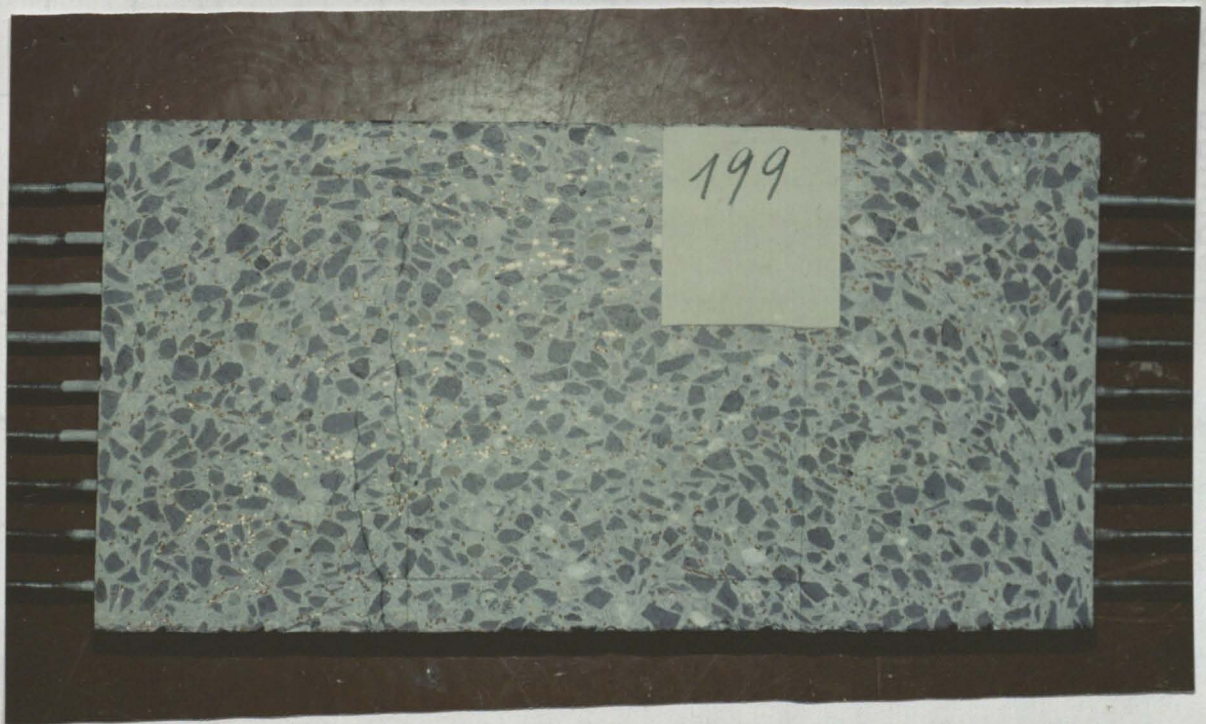


Bild 34: Rückwärtige Seite des in Bild 30 gezeigten Probekörpers.

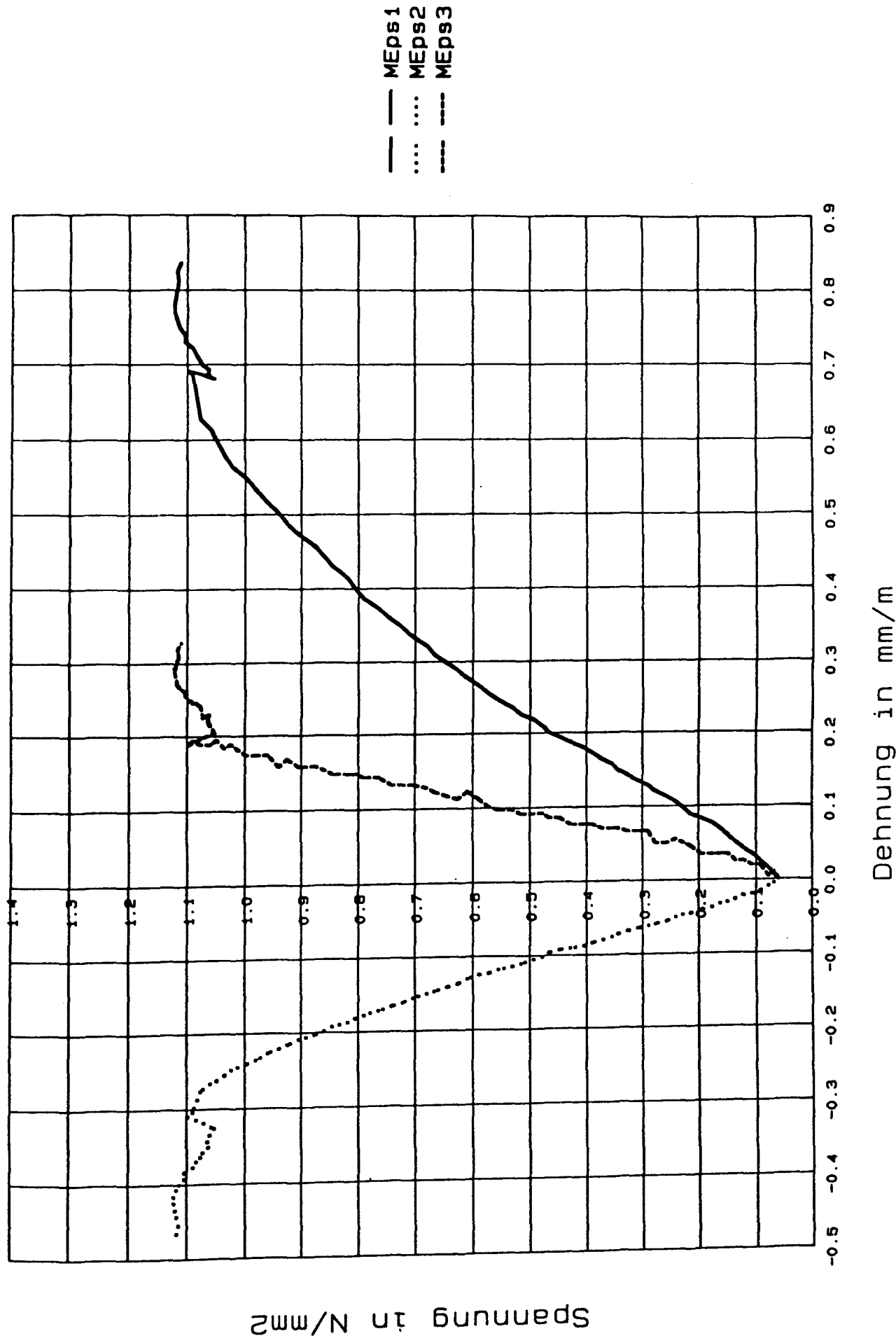


Bild 35: Am Probekörper 200 gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Probe wurde unter Druckbelastung von rd. 75 % der Kurzzeitdruckfestigkeit im Zugversuch geprüft.



Bild 36: Probe 200 nach Durchführung des Zugversuches. Das Versagen des Probekörpers trat durch Rißbildung am Rand der druckbelasteten Fläche auf.



Bild 37: Rückwärtige Seite des in Bild 30 gezeigten Probekörpers.

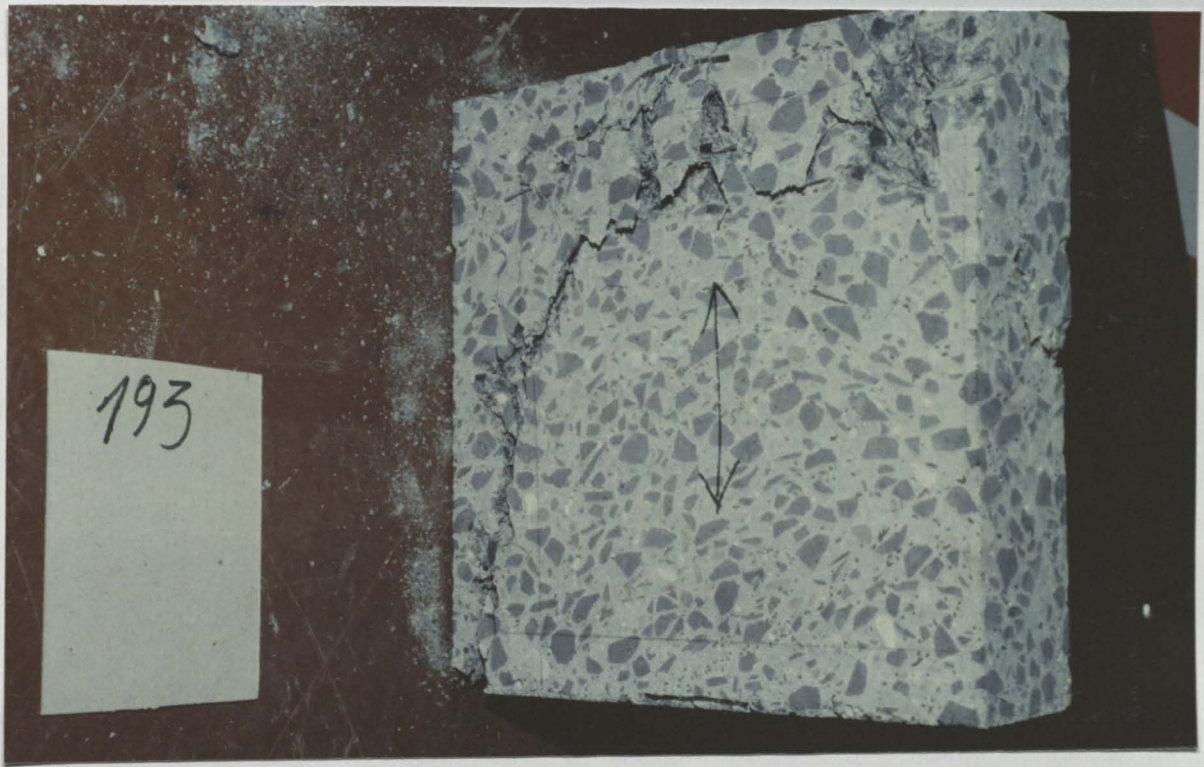


Bild 38: Im einaxialen Druckversuch geprüftes Reststück der Probe 193.

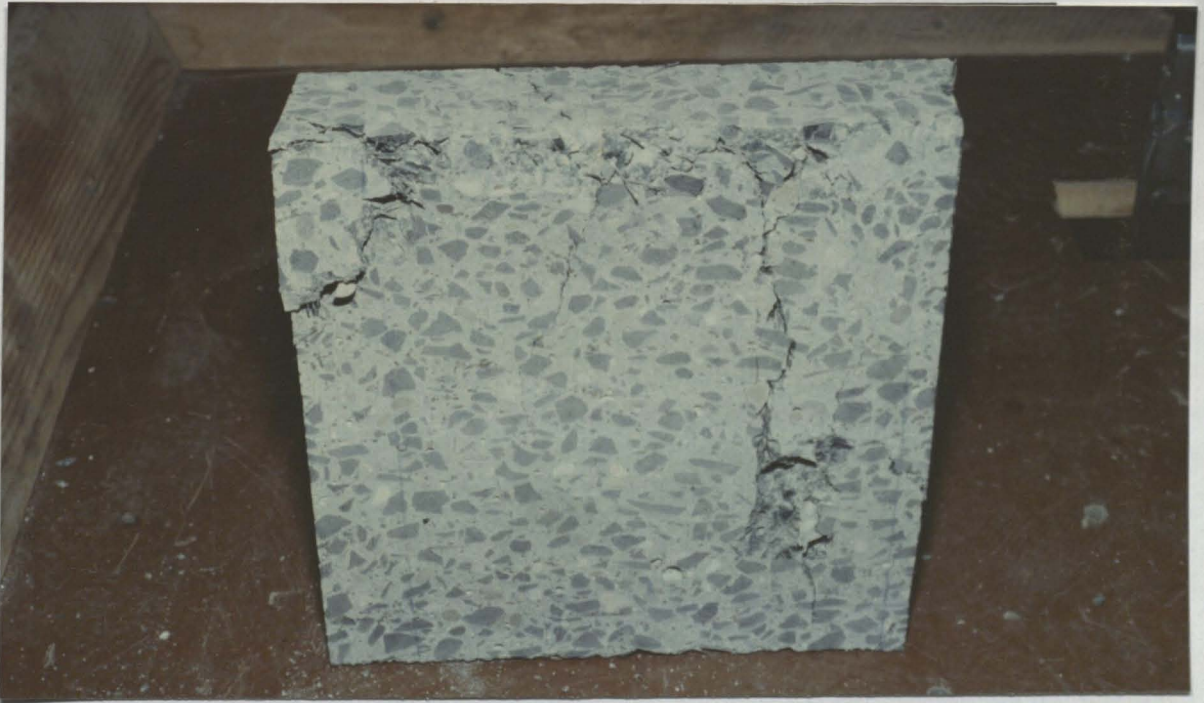


Bild 39: rückwärtige Ansicht der in Bild 39 gezeigten Probe.

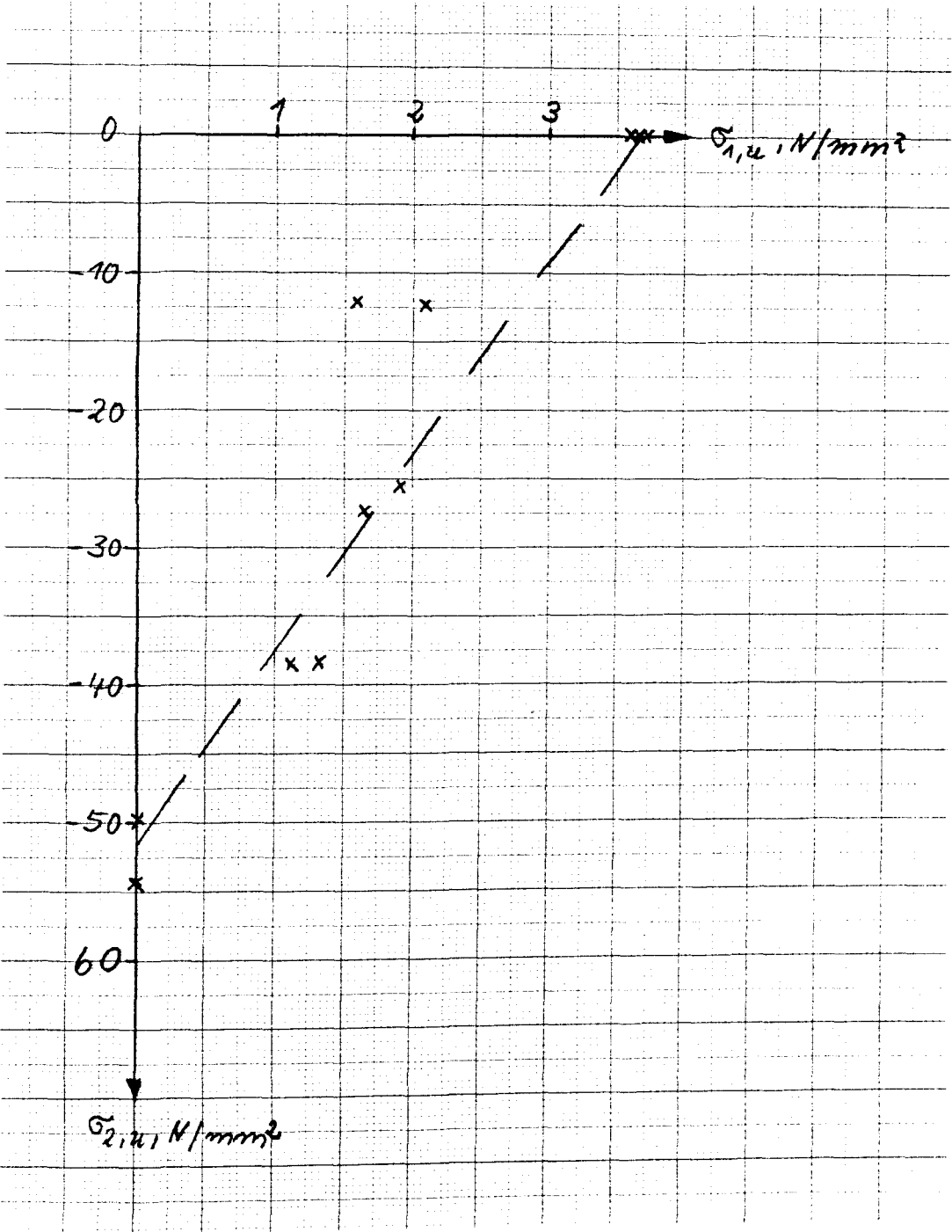


Bild 40: Bruchgrenzkurve des unter kombinierter Druck-Zug-Beanspruchung geprüften Stahlfaserbetons.

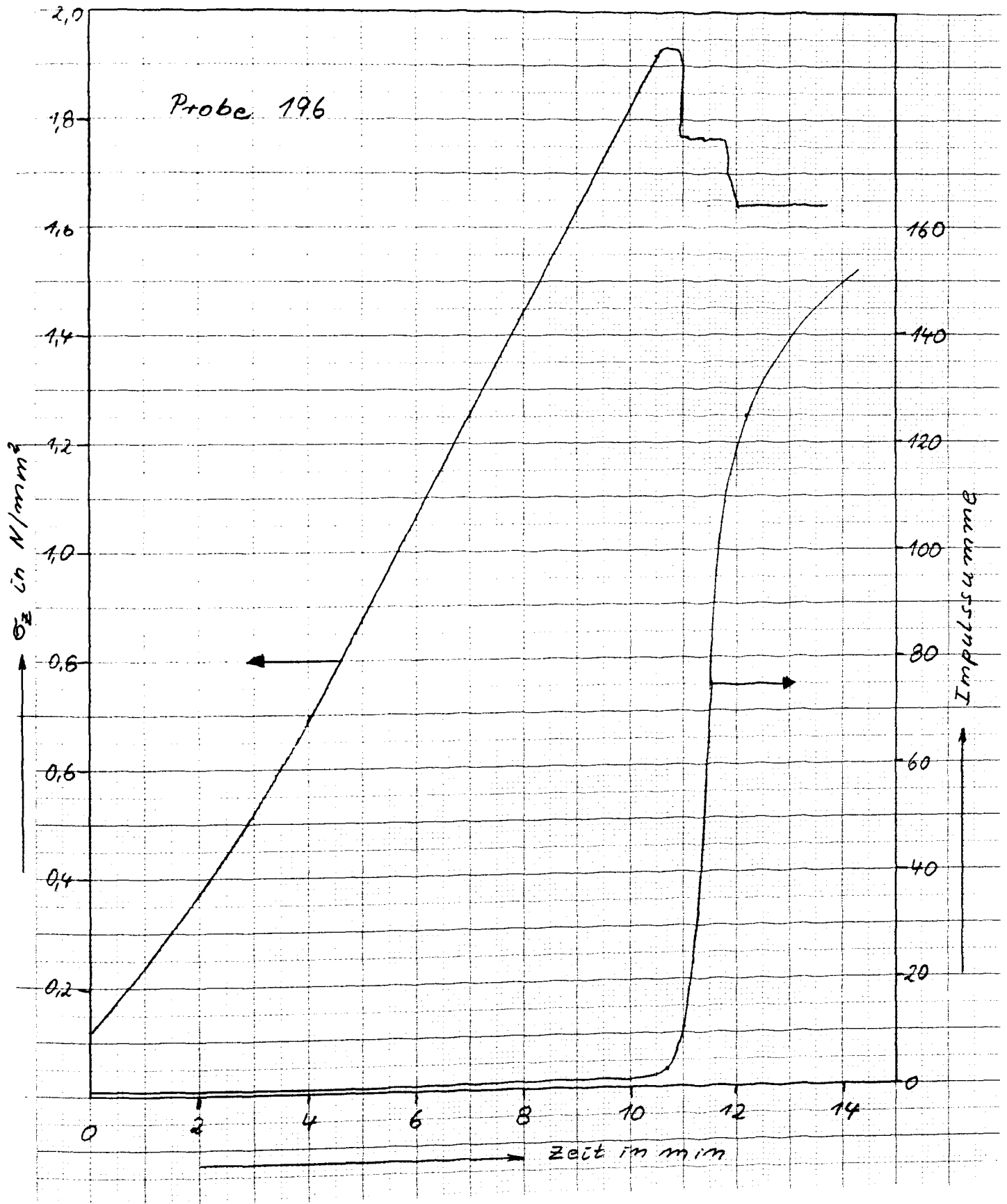


Bild 41: Schallimpulssummen- und Zugspannungsverlauf bei Probe 196 (Druckbeanspruchung während der Durchführung des Zugversuchs rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit). Bis zur Ausbildung des Risses der schließlich zum Versagen der Probe führt, verbleibt die Schallemission auf relativ geringem Niveau.

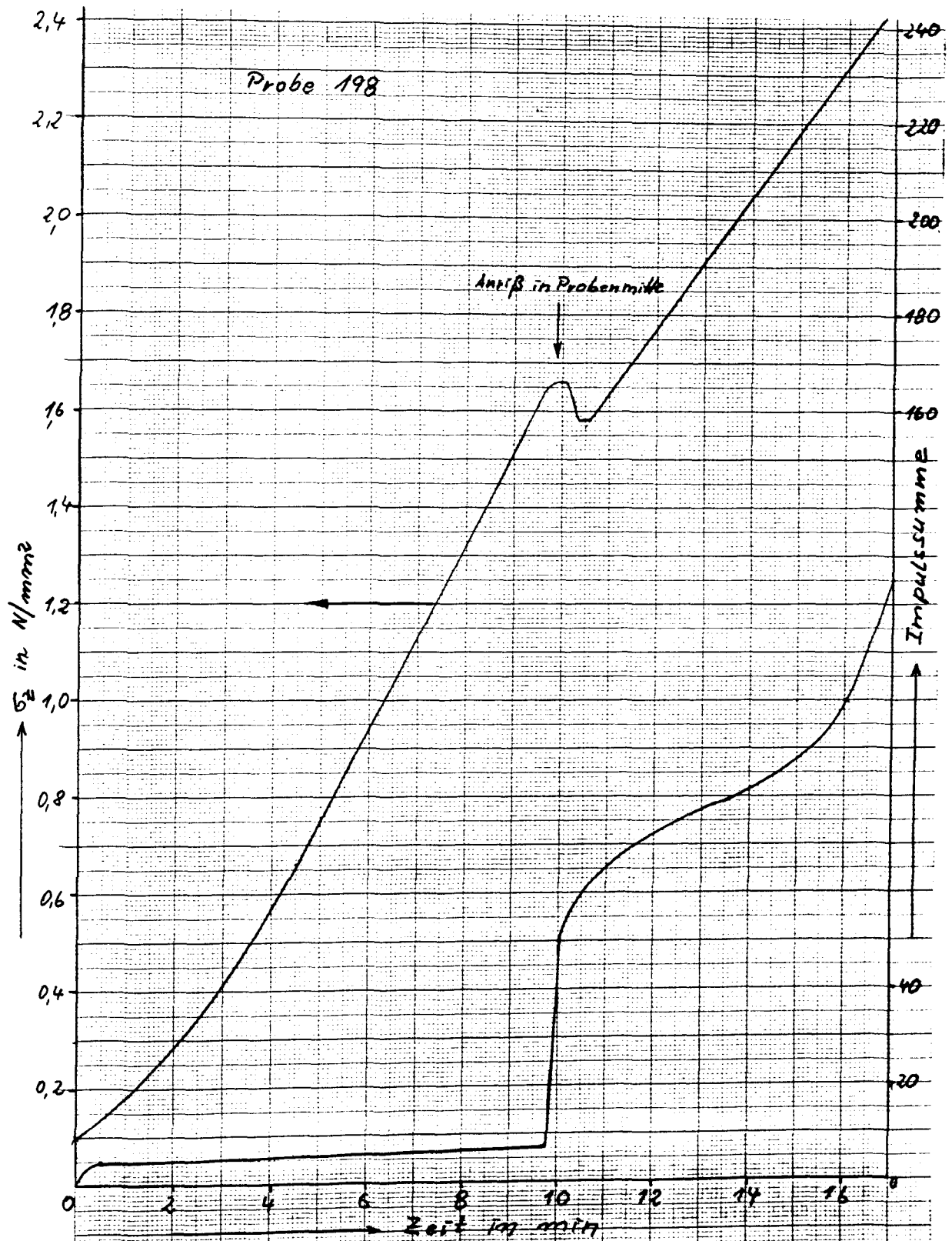


Bild 42: Schallimpulssummen- und Zugspannungsverlauf bei Probe 198 (Druckbeanspruchung während der Durchführung des Zugversuchs rd. 25 % der Kurzzeitdruckfestigkeit). Die Rißbildung im Probenmitte zeigt sich im sprunghaften Anstieg der Schallemission.

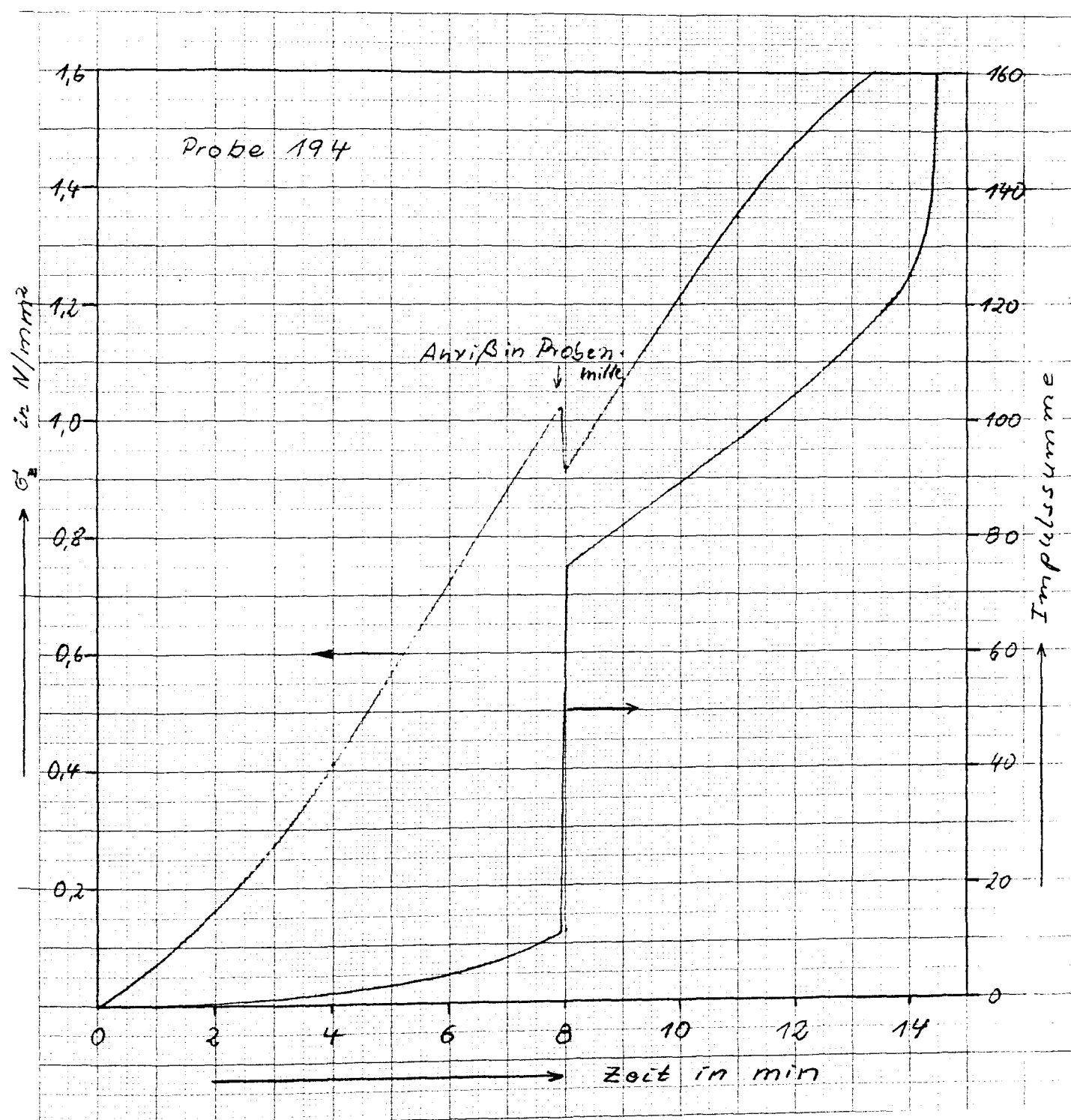


Bild 43: Schallimpulssummen- und Zugspannungsverlauf bei Probe 194 (Druckbeanspruchung während der Durchführung des Zugversuchs rd. 50 % der Kurzzeitdruckfestigkeit). Der später beobachtete Anriß in der Probenmitte verursachte einen starken Anstieg der Schallemission.

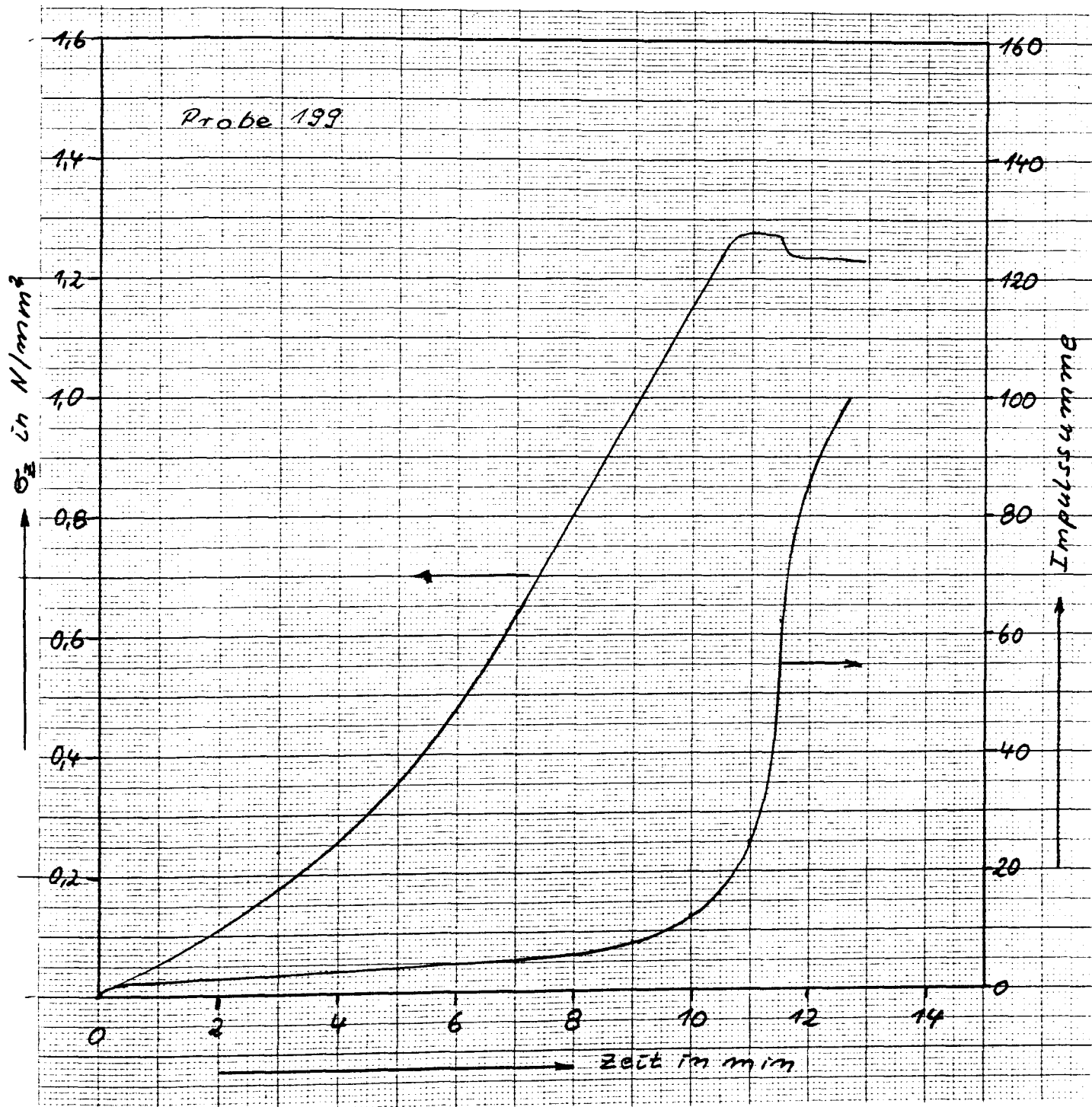


Bild 44: Schallimpulssummen- und Zugspannungsverlauf bei Probe 199 (Druckbeanspruchung während der Durchführung des Zugversuchs rd. 75 % der Kurzzeitdruckfestigkeit). Während der gesamten Belastungsphase relativ hohe Schallemission, die sich kurz vor dem Versagen der Probe noch verstärkt.

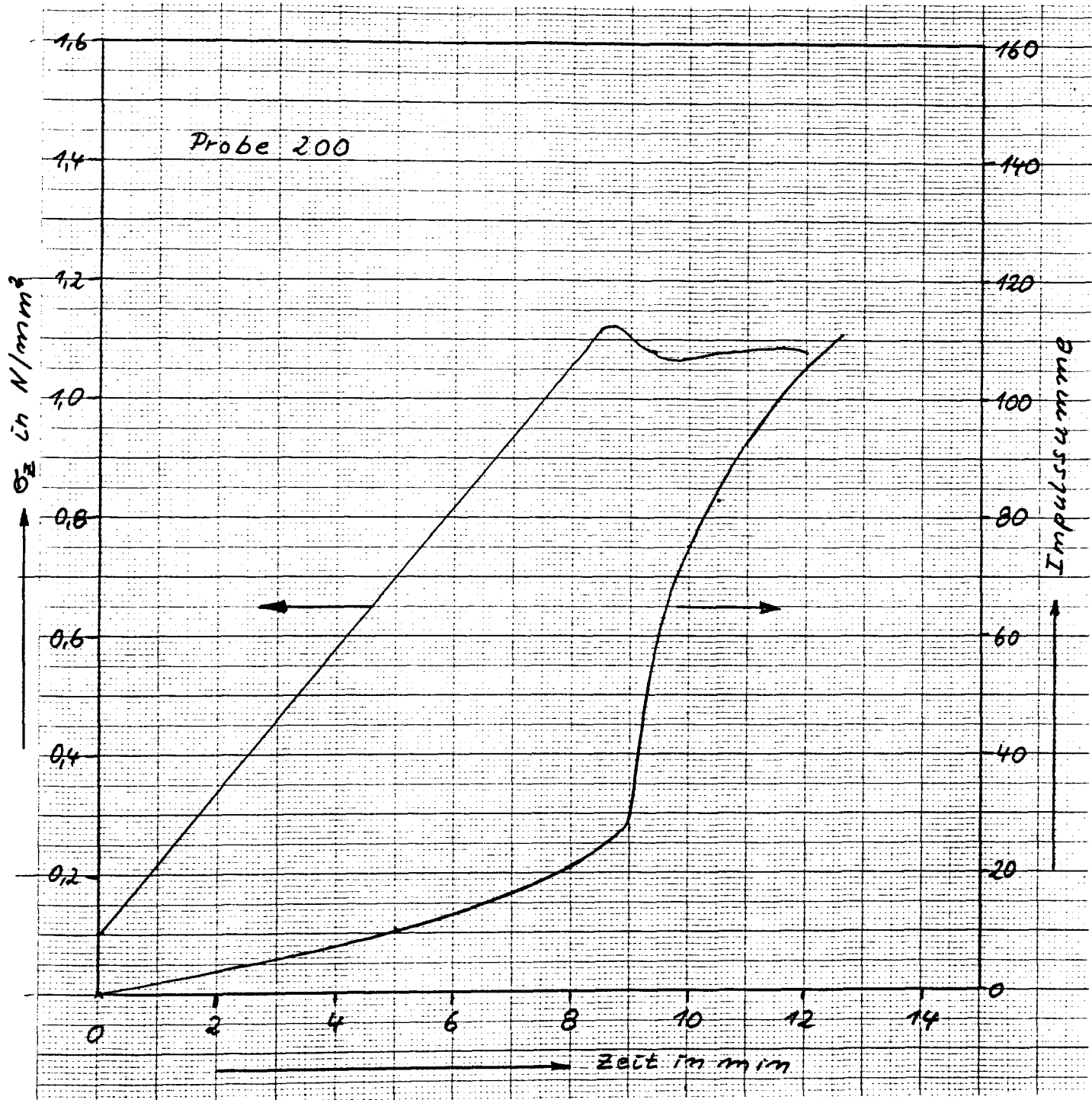


Bild 45: Schallimpulssummen- und Zugspannungsverlauf bei Probe 200 (Druckbeanspruchung während der Durchführung des Zugversuchs rd. 75 % der Kurzzeitdruckfestigkeit). Während der gesamten Belastungsphase sehr hohe Schallemission; das Versagen der Probe kündigt sich weiteren starken Anstieg der Schallemission an.